TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE INDIRIZZO SPAZIALE

Pannelli fotovoltaici a basso costo per piccoli satelliti: progettazione, sviluppo e qualifica per applicazione su UniSat5

Stefan Gregucci

Anno Accademico 2011-2012

T283





UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA

Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Aerospaziale Indirizzo Spaziale

Pannelli fotovoltaici a basso costo per piccoli satelliti: progettazione, sviluppo e qualifica per applicazione su UniSat5

Relatori:

Prof. Ing. S. Marcuccio

Candidato:

Stefan Gregucci

Dr. Ing. P.Pergola

Anno Accademico 2011-2012

Quando saranno inventate le navi per attraversare il vuoto delle stelle vi saranno anche uomini che si faranno avanti per pilotarle. Johannes Kepler

A chi mi ha sorretto e guidato nel cammino

SOMMARIO

I pannelli solari per la generazione di potenza nello spazio sono molto costosi e ogni piccolo miglioramento nello sviluppo, produzione e processo di qualificazione può produrre risparmi significativi per i piccoli satelliti a basso costo.

Questo lavoro presenta le attività di ricerca svolte in collaborazione tra l'Università di Pisa e Alta Spa circa la progettazione, la produzione e l'assemblaggio di un pannello fotovoltaico per applicazione su piccoli satelliti in preparazione di un test di volo previsto per l'inizio del 2013 a bordo del micro satellite UniSat-5.

Il metodo sviluppato è basato sul basso costo e su tecniche a "bassa tecnologia" per assemblare e qualificare il pannello.

La prima parte di questo lavoro delinea il progetto del pannello ed i processi di costruzione. L'approccio adottato prevede l'uso di un circuito stampato dove le celle "nude" sono installate attraverso un nastro biadesivo isolante e ciascuna cella è ricoperta con un vetro in borosilicato drogato con ossido di cerio, usando un silicone a volatilità controlla. L'incollaggio è realizzato con la tecnica del sacco a vuoto, sviluppata in casa.

La seconda parte descrive la caratterizzazione elettrica del pannello e il test di termo vuoto effettuato per valutare le proprietà di outgassing del *protofligth model* sviluppato ad Alta, in particolare dell'unità di volo progettata e sviluppata per essere montata sul satellite UniSat-5.

ABSTRACT

Solar panels for power generation in space are quite expensive and even small improvements in the development, production and qualification process may result in significant savings for low cost small satellites.

This thesis presents the research activities carried out in collaboration with the University of Pisa and Alta SpA about the design, manufacturing and assembly of a photovoltaic panel for small satellite applications in preparation of a test flight scheduled for early 2013 on the UniSat-5 small spacecraft.

The method developed is based on low cost and "low tech" techniques to assemble and qualify the panel.

The first part of this study outlines the panel design and the manufacturing processes. The approach adopted uses a printed circuit board where bare cells are installed by means of a double-sided insulating adhesive tape and each cell is covered with cerium doped borosilicate glass, using a controlled volatility silicone. Bonding was performed with a dedicated vacuum bag technique, in-house developed.

The second part describes the electrical characterization of the panel and the thermal vacuum test carried out to estimate the outgassing properties of the *protoflight model* developed at Alta, in particular of the flight unit designed and developed to be mounted on board of the UniSat-5 satellite.

RINGRAZIAMENTI

Desidero sentitamente ringraziare il Prof. Salvo Marcuccio e l'Ing. Pierpaolo Pergola per la preziosa opportunità che mi è stata concessa, oltre che per la disponibilità ed il supporto durante quest'anno di tesi. Il ringraziamento è esteso quindi ad Alta SpA e tutti i dipendenti, in particolare a Stefano Caneschi, all' Ing. Nicola Giusti e all' Ing. Carlo Tellini per il loro fondamentale aiuto e contributo sia dal punto di vista professionale che personale.

Desidero inoltre ringraziare Chantal Cappelletti, il gruppo GAUSS ed in particolare Giuseppe Martinotti, per la preziosa opportunità di volo che mi hanno messo a disposizione e per il supporto che mi hanno fornito, oltre che per le celle solari che mi sono state gentilmente offerte.

Un ringraziamento va alle aziende che mi hanno fornito campioni omaggio dei propri prodotti e ai rispettivi interlocutori: Nicolas Zambon per la NuSil Technology, Lynam Matt per la Qioptiq, Silvia Radu per l'Airtech Europe e Roberto Bonetta per la RBMetali e per la Schlenk.

Con la consapevolezza che con qualche rigo non potrò certamente sdebitarmi nei confronti di chi è stato la mia forza e il mio supporto in tutti questi anni, il mio più sincero ringraziamento va ai miei genitori, senza i quali non sarei potuto arrivare a questo punto, a mia sorella Doriana augurandole di raggiungere ben presto i suoi sogni, ad Ambra che mi ha supportato e sopportato in ogni momento, alla sua famiglia, al resto della mia famiglia, amici, colleghi e chiunque che leggendo queste righe si sentirà considerato.

Infine, il mio ringraziamento va ai miei due pannellini, croce e delizia di quest'ultimo anno e un grande in bocca al lupo al "piccolo" Filonide che nei prossimi mesi spiccherà il volo.

Stefan

INDICE

INDICE	i
INDICE DELLE FIGURE	iii
INDICE DELLE TABELLE	ix
I PICCOLI SATELLITI	1
1.1 Introduzione	1
1.2 Classificazione dei piccoli satelliti	4
1.3 Il microsatellite UniSat5	4
1.3.1 Parametri di lancio e orbitali	5
1.3.2 Sottosistemi di UniSat-5	5
1.4 Obiettivi	8
1.5 Sviluppo del lavoro	8
PANNELLI FOTOVOLTAICI	11
2.1 Introduzione	11
2.2 Celle fotovoltaiche	12
2.3 Le celle fotovoltaiche Azur Space 3G30C	21
2.4 Pannelli fotovoltaici	23
PROGETTAZIONE DEL PANNELLO	27
3.1 Requisiti di progetto	27
3.2 Scelte progettuali	
3.3 Vetrini di protezione	31
3.4 Adesivi per l'incollaggio delle celle e dei vetrini	35
3.4.1 Nastro biadesivo CV4-1161-5P	35
3.4.2 Silicone CV15-2500P	
3.5 Ribbon per uso fotovoltaico	

3.6 Diodi di blocco e bypass	40
3.7 Termocoppie di tipo J	42
3.8 Circuito stampato	43
3.8.1 Requisiti meccanici ed elettrici	43
3.8.2 Sviluppo del circuito stampato e scelte progettuali	43
COSTRUZIONE DEL PANNELLO	49
4.1 Introduzione	49
4.2 Saldatura del contatto posteriore della cella	50
4.3 Saldatura dei diodi	53
4.4 Taglio dei vetrini di protezione	54
4.5 Incollaggio delle celle sul PCB	56
4.6 Saldatura dei contatti della cella	62
4.7 Incollaggio dei vetrini	64
4.8 Completamento del pannello	70
QUALIFICA DEL PANNELLO FOTOVOLTAICO	73
5.1 Introduzione	73
5.2 Curva caratteristica del pannello fotovoltaico	75
5.2.1 Curve caratteristiche del primo prototipo	80
5.2.2 Curve caratteristiche del secondo prototipo (unità di vol	lo) 82
5.3 Test di termo-vuoto per determinare l'outgassing del pannel	lo 86
CONCLUSIONI E PROSPETTIVE DI SVILUPPO	97
6.1 Conclusioni	97
6.2 Sviluppi futuri	100
BIBLIOGRAFIA	101

INDICE DELLE FIGURE

Capitolo 1

Fig 1. 1 -	Un Tubesat (sinistra) ed un CubeSat (destra) a confronto	.3
Fig 1. 2 -	Forma e dimensioni esterne di UniSat-5 [7]	.7

Capitolo 2

Fig 2. 1 - Rappresentazione dell'effetto fotovoltaico che converte la luce del Sole in elettricità [12]; la giunzione p-n è composta da due zone, una con un eccesso di elettroni (strato n) e una ad eccedenza di lacune (strato p); il Fig 2. 2 - La struttura base della cella fotovoltaica [12]: partendo dal basso si nota il substrato, il contatto posteriore positivo esteso su tutta la superficie della cella, il semiconduttore di tipo p, la giunzione n-p, il semiconduttore di tipo n, il contatto superiore della cella disposto a forma di griglia ed il sottile Fig 2. 4 - Tipiche variazioni delle curve caratteristiche in funzione della radiazione incidente sulla cella.....17 Fig 2. 5 - Tipiche variazioni delle curve caratteristiche in funzione della Fig 2. 6 - Celle fotovoltaiche a tripla giunzione: la struttura (sinistra), il circuito equivalente della cella (centro), lo spettro solare convertito da ogni giunzione (destra) [12][13]......20 Fig 2. 7 - Comparazione della risposta spettrale di una cella a singola giunzione e una a tripla giunzione [13]......20 Fig 2. 8 - Dimensioni della cella Azur Space 3G30C [14].....21 Fig 2. 9 - Schema elettrico della cella e del diodo di by-pass integrato. Con N è identificata la superficie superiore della cella, con P quella inferiore. Il

della cella successiva, pertanto la prima cella della stringa ha bisogno di un diodo di bypass esterno	diodo di by-pass integrato deve essere collegato con il contatto pos	itivo
diodo di bypass esterno	della cella successiva, pertanto la prima cella della stringa ha bisogno c	li un
Fig 2. 10 - Tipi di celle solari e metodi di conversione della potenza usati	diodo di bypass esterno	22
nei pico e nano-satelliti	Fig 2. 10 - Tipi di celle solari e metodi di conversione della potenza i nei pico e nano-satelliti.	usati 26

Capitolo 3

Fig 3.1 - Rappresentazione della superficie massima occupabile dal pannello e delle aree in cui prevedere i fori di fissaggio del pannello
Fig 3. 2 - Dimensioni originali dei vetrini di protezione
Fig 3. 3 - Vetrino originale con il riferimento antiriflesso visibile in alto a destra
Fig 3. 4 - Il vetrino originale (sinistra) e quello definitivo (destra)
Fig 3. 5 - Taglio del nastro biadesivo utilizzando una dima sagomata come le celle e dotata di intagli per lasciare liberi i contatti per le saldature 36
Fig 3. 6 - La fase di preparazione della colla: i due componenti della colla visibili in alto a sinistra sono stati miscelati in rapporto di massa 1:1 ed è in corso la deareazione nella campana a vuoto
Fig 3. 7 - Il primer CF1-135
Fig 3. 8 - La bobina di ribbon
Fig 3. 9 - Le dimensioni principali dei diodi in millimetri
Fig 3.10 - Schema elettrico del circuito stampato
Fig 3. 11 - Test elettrici e prove di saldatura su una coppia di celle collegate secondo la configurazione di progetto
Fig 3. 12 - Layout del circuito stampato, con indicate le dimensioni esterne.
Fig 3. 13 - Foto del circuito stampato, in cui sono evidenti le scanalature e la piazzole su cui sarà incollata la cella solare

Capitolo 4

Fig 4. 1 - La cella è posizionata all'interno della maschera realizzata per la saldatura, quando la parte inferiore della maschera è chiusa, sono visibili solo le aree destinate alla saldatura
Fig 4. 2 - Il ribbon è posizionato sulla superficie su cui sarà saldato e si procede alla saldatura con il saldatore ad aria (l'ugello è visibile nella parte alta dell'immagine)
Fig 4. 3 - Cella solare con i due contatti positivi saldati
Fig 4. 4 - La saldatura del diodo: (a) la pasta saldante viene deposta sulle piazzole; (b) il diodo viene posizionato sulla pasta saldante; (c) viene effettuata la saldatura tramite un saldatore ad aria calda
Fig 4. 5 - Taglio dei vetrini: (a) inizia il taglio, (b) taglio delle tacche, (c) separazione delle due parti
Fig 4. 6 - Comparazione del vetrino originale (sinistra) con il vetrino tagliato (destra): sono evidenti le tacche corrispondenti al diodo integrato e ai contatti della cella
Fig 4. 7 - Taglio del nastro: a) posizionamento della dima; b) risultato finale.
 Fig 4. 7 - Taglio del nastro: a) posizionamento della dima; b) risultato finale. 57 Fig 4. 8 - Incollaggio del nastro sulla scheda: (a) il nastro viene posizionato; (b) il nastro viene incollato con l'ausilio della spatola in teflon.
 Fig 4. 7 - Taglio del nastro: a) posizionamento della dima; b) risultato finale.
 Fig 4. 7 - Taglio del nastro: a) posizionamento della dima; b) risultato finale. 57 Fig 4. 8 - Incollaggio del nastro sulla scheda: (a) il nastro viene posizionato; (b) il nastro viene incollato con l'ausilio della spatola in teflon. 59 Fig 4. 9 - La scheda con il nastro biadesivo applicato su ogni piazzola in cui saranno incollate le celle. 60 Fig 4. 10 - Incollaggio della cella sulla scheda: (a) rimozione della pellicola del nastro; (b) posizionamento della cella sul nastro biadesivo; (c) con l'ausilio di spatole di teflon viene fatta aderire al nastro.
 Fig 4. 7 - Taglio del nastro: a) posizionamento della dima; b) risultato finale. 57 Fig 4. 8 - Incollaggio del nastro sulla scheda: (a) il nastro viene posizionato; (b) il nastro viene incollato con l'ausilio della spatola in teflon. 59 Fig 4. 9 - La scheda con il nastro biadesivo applicato su ogni piazzola in cui saranno incollate le celle. 60 Fig 4. 10 - Incollaggio della cella sulla scheda: (a) rimozione della pellicola del nastro; (b) posizionamento della cella sul nastro biadesivo; (c) con l'ausilio di spatole di teflon viene fatta aderire al nastro. 61 Fig 4. 11 - La saldatura dei contatti superiori della cella: (a) deposizione della pasta saldante; (b) posizionamento del ribbon; (c) saldatura, si nota il flussante fluire lontano dalla saldatura.

Capitolo 5

Fig 5. 1 - Caratterizzazione della cella: il test è stato svolto all'aperto, l'apparato è composto da un multimetro, dalla cella montata su una millefori utilizzata per collegare le resistenze da applicare come carico alla cella, da Fig 5. 2 - Curva caratteristica della cella solare......75 Fig 5. 4 - Lo schema del circuito per caratterizzare il pannello: il "+" ed il "-" sono i terminali del pannello; è visibile il parallelo di resistenze e il posizionamento degli strumenti di misura......77 Fig 5. 5 - Il piranometro, è possibile leggere il fatto di calibra mento dello strumento (Sensitivity) e sono visibili gli spinotti che si collegheranno al voltmetro......78 Fig 5. 6 - Il setup sperimentale: (a) è visibile il pannello e il piranometro entrambi disposti sulla stessa superficie, con il filo del piranometro rivolto verso il nord; (b) a sinistra si può notare l'integrato LM317 montato su una piastra alettata per dissipare il calore, il potenziometro e i due interruttori che attivano il ramo del circuito in cui c'è ciascuna resistenza in parallelo; a destra ci sono tre multimetri, uno per misurare la tensione ai capi del pannello, l'altro la corrente e l'ultimo il voltaggio del piranometro. 79 Fig 5.7 - Curve caratteristiche del primo prototipo relative alla Prova1.....81 Fig 5.8 - Curve caratteristiche del primo prototipo relative alla Prova2.....82 Fig 5.9 - Curve caratteristiche del secondo prototipo relative alla Prova1.84 Fig 5. 10 - Curve caratteristiche del secondo prototipo relative alla Prova2. Fig 5. 11 - Le curve caratteristiche delle due prove messe a confronto......85 Fig 5. 12 - Disposizione delle termocoppie sul pannello, è inoltre visibile il Fig 5. 13 - La preparazione del setup sperimentale: è visibile la copertura in Fig 5. 14 - La camera a vuoto (dietro), il sistema di alimentatori (al centro a destra) e il multimetro per misurare la tensione a vuoto del pannello fotovoltaico (sotto a destra)......90 Fig 5. 15 - Pesatura del prototipo con la termocoppia di tipo J (di cui è visibile il cavo intrecciato bianco e nero) e i fili di connessione (cavo 5. 16 - Il pannello in camera a vuoto nella fase di Fig riscaldamento/illuminazione durante il test di termo vuoto......92 Fig 5. 17 - Il profilo di temperatura durante la fase di test: in rosso la temperatura della termocoppia interna che è stata monitorata per controllare l'accensione e lo spegnimento del sistema di alimentazione; in giallo la Fig 5. 19 - Andamento della tensione a vuoto durante l'esperimento. I valori sono filtrati dalle fasi di non illuminazione. La diminuzione della tensione iniziale deriva dalla diminuzione della potenza fornita alle lampadine e dalla dipendenza della tensione a circuito aperto dal gradiente di temperatura (-6mV/°C [14])......95

Capitolo 6

Fig 6	. 1 -	Il	prototipo	del	circuito	stampato	è	montato	su	un	modello	del
micro	satel	lite	UniSat-5				•••			•••••	•••••	. 99

INDICE DELLE TABELLE

Capitolo 1

Tabella 1. 1 - Classificazione de	ei piccoli satelliti in	funzione del peso.	4
Tabella 1. 2 - Parametri orbitali	UniSat-5	••••••	5

Capitolo 2

Capitolo 3

lla 3. 1 - Proprietà dei vetrini CMG3	2
lla 3. 2 Proprietà del CV4-1161-5P3	5
lla 3. 3 - Proprietà del CV15-2500P3	7
lla 3. 4 - Principali proprietà del diodo4	2

Capitolo 5

Tabella 5. 1 - Intervalli di corrente in cui far operare il pannello in funzionedelle resistenze che vengono attivate nel circuito.77

Fabella 5. 2 - Tensione, corrente, potenza, differenza di potenziale, misurate
ei test del primo prototipo
Cabella 5. 3 - Rendimento del primo prototipo. 82
Cabella 5. 4 - Tensione, corrente, potenza, differenza di potenziale, misuratenei test del secondo prototipo.83
Sabella 5. 5 - Rendimento del secondo prototipo.
Sabella 5. 6 - TML% dei due prototipi

1

I PICCOLI SATELLITI

Nel presente capitolo sono definiti i piccoli satelliti e le categorie in cui si suddividono. Ad una presentazione dei motivi principali per cui il settore dei piccoli satelliti è in continua crescita e sviluppo, segue la descrizione del microsatellite UniSat-5, per il quale è progettato e costruito il pannello fotovoltaico oggetto di questo lavoro.

1.1 Introduzione

L'obiettivo di questo lavoro è progettare e costruire un pannello fotovoltaico a basso costo per piccoli satelliti, in particolare per l'applicazione sul microsatellite UniSat-5.

I piccoli satelliti, cioè satelliti aventi una massa inferiore ai 500kg [1], sono presenti da circa mezzo secolo, ma l'interesse in questo settore oggi è notevolmente in crescita. Pannelli fotovoltaici a basso costo per piccoli satelliti: progettazione, sviluppo e qualifica per applicazione su UniSat5

Numerosi enti accademici, governativi e commerciali hanno avviato in tutto il mondo progetti per lo sviluppo di piccoli satelliti. Questo accresciuto interesse è dovuto alla convergenza di numerosi fattori [1][2]:

- la miniaturizzazione delle varie tecnologie disponibili, in particolare quelle elettroniche;
- la possibilità di indipendenza nel campo spaziale e l'estensione anche a piccoli enti e paesi emergenti della possibilità di avere acceso allo spazio;
- larga varietà di missioni e quindi più soggetti interessati a questa tecnologia;
- questioni economiche, commerciali, militari, di test e sviluppo di nuove tecnologie;
- esperimenti scientifici e scopi educativi;
- possibilità di progettare missioni con un obiettivo specifico;
- riduzione della complessità della missione e dei costi.

Nonostante il fatto che i piccoli satelliti siano attualmente cosi in voga, va comunque ricordato che i primi satelliti messi in orbita più di 50 anni fa erano dei piccoli satelliti: l'età spaziale inizia nel 1957 con il lancio del satellite russo Sputnik 1 il cui peso era di 75kg [1] e l'avvento degli Stati Uniti nello spazio avviene con il lancio di Explorer 1 [2] (ufficialmente chiamato Satellite 1958 Alpha) la cui massa era di appena 13.97kg. Tuttavia i costi proibitivi di questi progetti spaziali hanno limitato l'accesso allo spazio a diverse Nazione ed Agenzie internazionali, per questo si sta cercando di sovvertire questa tendenza attraverso lo sviluppo dei piccoli satelliti [2].

Inoltre, poiché la dimensione di un satellite corrisponde direttamente ai costi associati con i materiali, la manodopera per lo sviluppo, il combustibile per il veicolo di lancio, è naturale quindi dedurre che i vantaggi principali dei piccoli satelliti siano il basso costo ed i limitati tempi di sviluppo. Quest'ultimo fattore implica, in particolare, che nuovi carichi utili (*payload*) e tecnologie possono essere continuamente inserite e testate direttamente nello spazio [1].

In aggiunta, rispetto ad un solitario, grande e convenzionale satellite, una rete di diversi piccoli satelliti è potenzialmente più flessibile, in quanto può essere riconfigurata in base alle esigenze di missione [1].

Nonostante questi potenziali vantaggi dei piccoli satelliti, la sfida più grande è quella di trovare costanti opportunità di lancio a costi accessibili. Lo scenario tipico è quello di attendere l'opportunità di volare come un *payload* ausiliario su un razzo in cui è alloggiato un satellite di grandi dimensioni, oppure attendere che siano disponibili molteplici piccoli satelliti per uno stesso lancio [1]. Questo processo può richiedere alcuni mesi o anni da dopo che il satellite è stato costruito ed è ovviamente una sconfitta per i vantaggi di rapida risposta e di veloce inserimento di nuove tecnologie.

Tuttavia, diverse opportunità per il lancio dedicate ai piccoli satelliti sono presenti con l'avvento e il consolidamento dei CubeSat (Fig 1. 1), termine che si riferisce a satelliti a forma di cubo di lato 10cm e aventi una massa fino ad 1.33kg [3] (queste dimensioni standard sono identificate come 1U), e dei Tubesat (Fig 1. 1), un' alternativa a basso costo dei CubeSat, nel cui nel kit è compreso il costo di lancio in un'orbita LEO, per un totale di \$8000 [1][4].



Fig 1. 1 - Un Tubesat (sinistra) ed un CubeSat (destra) a confronto.

1.2 Classificazione dei piccoli satelliti

I piccoli satelliti possono essere ulteriormente classificati in base al proprio peso, così come riportato in Tabella 1. 1 [2][5].

Categoria	Peso (kg)
Minisatellite	100-500
Microsatellite	10-100
Nanosatellite	1-10
Picosatellite	0.1-1
Femtosatellite	< 0.1

Tabella 1.1 - Classificazione dei piccoli satelliti in funzione del peso.

In particolare UniSat-5, le cui caratteristiche saranno descritte nel Paragrafo 1.3, rientra nella categoria dei microsatelliti.

In generale, le aree di maggiore di lavoro per micro e nano satelliti sono [2]:

- comunicazioni specializzate;
- esperimenti scientifici in piccola scala;
- rilevazione remota;
- dimostrazione tecnologica;
- educazione e formazione.

I microsatelli operano in orbite LEO (Low Earth Orbits), la cui altitudine è tra 600km e 2000km. Al di sotto dei 600km la vita orbitale è troppo limitata ed imprevedibile a causa dell'elevato attrito atmosferico, mentre con l'aumentare dell'altitudine dell'orbita, la radiazione ambientale causata dalle fasce di Van Allen aumenta bruscamente, riducendo la durata dei componenti elettronici e rendendo necessaria un' ulteriore schermatura [6].

1.3 Il microsatellite UniSat5

UniSat-5 [7] è un microsatellite civile e scientifico progettato e realizzato da GAUSS Srl (Group of Astrodynamics for the Use of Space System) la cui missione principale è quella di testare strumentazione prodotta dai propri ricercatori, creare patrimonio per successive missioni e fornire formazione per studenti provenienti da diverse università. Il satellite sarà equipaggiato con quattro strumenti principali:

- GlioSat, un esperimento biomedico spaziale con l'obiettivo di indagare circa l'effetto combinato della microgravità e delle radiazioni ionizzanti sul comportamento delle cellule di glioblastoma;
- un sistema stand-alone per la produzione di immagini digitali ad alta definizione. Lo scopo di questo sistema è osservare la superficie terrestre, nonché detriti spaziali *in situ*;
- MRFOD (Morehead-Roma FemtoSat Orbital Deployer), un sistema di rilascio per femtosatelliti sviluppato da studenti;
- GAUSS Srl PEPPOD-CubeSat Deployer System, un sistema di rilascio per CubeSat sviluppato da studenti.

1.3.1 Parametri di lancio e orbitali

Il lancio di UniSat-5 è previsto per la prima metà del 2013 con un lanciatore Dnepr [7][8]. UniSat-5 sarà lanciato in una configurazione cluster con altri satelliti provenienti da diversi paesi. I siti di lancio Dnepr sono il cosmodromo di Baikonur (Repubblica del Kazakhstan) e la base di lancio Yasny (Regione di Orenburg, Russia)[8]. Quest'ultimo sarà utilizzato per il lancio di UNISAT-5. Il lanciatore immetterà UniSat-5 un'orbita eliosincrona con parametri al punto di iniezione, indicati nella Tabella 1.2 [7].

UniSat-5	Valore	Deviazione massima ammissibile
Semi-asse maggiore	6978 km	+/- 10 km
Eccentricità	0	+/- 0.03
Inclinazione	97,8°	+/- 0.01
LTAN	22 hours 30 min	TBD

Tabella 1. 2 - Parametri orbitali UniSat-5.

1.3.2 Sottosistemi di UniSat-5

UniSat-5 è un parallelepipedo realizzato con una struttura di alluminio a nido d'ape rinforzata con barre di alluminio. Il peso totale del satellite è di

Pannelli fotovoltaici a basso costo per piccoli satelliti: progettazione, sviluppo e qualifica per applicazione su UniSat5

15 kg, la Fig 1. 2 mostra le dimensioni esterne di UniSat-5 [7]. In particolare è evidenziata la superficie in cui è presente l'interfaccia con il lanciatore Dnepr e sulla quale sarà alloggiato il pannello sviluppato durante questo lavoro di tesi.

Il satellite è stato dotato di quattro pannelli solari dispiegabili per aumentare la potenza disponibile a bordo, poiché uno dei problemi più comuni nei micro satelliti è l'esigenza di avere superfici esterne disponibili per sensori ed antenne, indispensabili per i payload o gli esperimenti presenti a bordo[7]. I pannelli solari sono equipaggiati con celle solari spaziali a tripla giunzione con un'efficienza media minima del 28%, prodotte da AzurSpace.

Il sistema di controllo d'assetto scelto, basato sull'uso di ruote di reazione e generatori di coppia magnetici, garantisce che lo stesso lato sia esposto al Sole per l'intera orbita, in questo modo il Sole colpisce i quattro pannelli quasi perpendicolarmente. In queste condizioni il sistema elettrico di potenza garantisce (nelle condizioni nominali) 200W di potenza.

L'accumulo di potenza è realizzato tramite batterie agli ioni di litio (Li-Ion) [7].



Fig 1. 2 - Forma e dimensioni esterne di UniSat-5 [7].

1.4 Obiettivi

Nel quadro presentato appare palese che il settore legato ai piccoli satelliti è di grande interesse ed in continuo sviluppo e mutamento.

Il basso costo della missione è sicuramente uno dei fattori più determinanti e importanti, insieme all'esigenza massimizzare lo sfruttamento di ogni superficie del satellite, in particolare per la produzione di energia. Si è visto, tuttavia, che spesso le superfici esterne sono destinate a strumenti, sensori ed antenne che generalmente non occupano la superficie nella sua interezza.

Il nostro lavoro si inserisce nella ricerca di massimizzare l'utilizzo delle superfici esterne per la produzione di energia, contenendo i costi di sviluppo e costruzione dei pannelli fotovoltaici.

Un ulteriore requisito che ci siamo preposti nello sviluppo del lavoro è l'individuazione di soluzioni tecnologiche "semplici" e facilmente accessibili per la costruzione del pannello, poiché l'accessibilità allo Spazio per piccole aziende, istituzioni universitarie ed accademiche rappresenta un altro dei fattori fondamentali e trascinanti del settore legato ai piccoli satelliti.

In particolare, in funzione degli obiettivi appena descritti, il pannello fotovoltaico oggetto del presente lavoro è stato progettato e costruito per l'applicazione sul microsatellite UniSat-5. L'approccio usato è quello dello sviluppo del *protoflight mode*, ovvero dello sviluppo di un'unità che funga sia da prototipo meccanico, funzionale e modello di qualifica.

1.5 Sviluppo del lavoro

Una breve descrizione dei pannelli fotovoltaici e delle celle fotovoltaiche, i componenti fondamentali del prototipo sviluppato, è presentata nel Cap. 2.

I requisiti di progetto derivanti dagli obiettivi preposti e dall'applicazione del pannello su UniSat-5, le scelte costruttive derivanti, la scelta dei componenti e il progetto del circuito stampato che rappresenta anche il supporto meccanico del pannello sono oggetto del Cap. 3.

Nel Cap. 4 si descrive la costruzione del pannello suddivisa per passi. Per ogni fase sono anche riportate le criticità incontrate nella costruzione del

primo prototipo e come sono state affrontate e risolte nella costruzione dell'unità di volo.

Infine, nel Cap. 5, sono riassunti i risultati della qualifica del pannello, in particolare sono definiti i requisiti che l'unità di volo deve possedere, la procedura di qualifica e quindi i risultati dei test di caratterizzazione elettrica e dei test di termo-vuoto per determinarne l'*outgassing* del pannello.

2

PANNELLI FOTOVOLTAICI

Nel presente capitolo sono descritti i pannelli fotovoltaici a partire dall'unità fondamentale che li costituisce, le celle fotovoltaiche. Ad una presentazione dei principi fisici fondamentali sul funzionamento delle celle fotovoltaiche, segue la descrizione delle celle Azur Space 3G30C, utilizzate per costruire il pannello fotovoltaico oggetto di questo lavoro. Sono quindi descritti i tipi principali di pannelli fotovoltaici.

2.1 Introduzione

La conversione fotovoltaica dell'energia del Sole è la più comune sorgente di potenza elettrica nello spazio. I pannelli fotovoltaici alimentano i carichi e caricano le batterie durante le fasi di illuminazione solare [9].

I pannelli fotovoltaici sono costituiti da celle fotovoltaiche connesse in una combinazione serie-parallelo per ottenere la tensione e la corrente richieste [9]. Pannelli fotovoltaici a basso costo per piccoli satelliti: progettazione, sviluppo e qualifica per applicazione su UniSat5

Per i piccoli satelliti, i pannelli fotovoltaici costituiscono la ovvia sorgente di potenza elettrica ed i piccoli satelliti sono eccellenti piattaforme per testare l'efficacia economica di nuove tecnologie di generazione di potenza: l'olandese Delfi-C3, ad esempio, testerà celle solari a film sottile con un'efficienza del 12% ma con un costo ridotto del 50% e con un incremento del 50% del rapporto potenza-massa [10].

Le caratteristiche fondamentali delle celle fotovoltaiche saranno ora sinteticamente introdotte.

2.2 Celle fotovoltaiche

Una cella fotovoltaica converte la luce solare in corrente elettrica. L'effetto fotovoltaico fu scoperto nel 1839 dal fisico francese Antoine Henri Becquerel e fu formalizzato da Albert Einstein nel 1905 nella più completa trattazione riguardante l'effetto fotoelettrico [9]. 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 [11].

Nel 1954, i Bell Labs scoprirono che il silicio poteva essere leggermente modificato per renderlo estremamente fotosensibile e realizzarono le prime cella solari al silicio [9].

Nel 1958 fu lanciato il satellite americano Vanguard 1, che fu il primo a montare pannelli fotovoltaici [9].

L'effetto fotovoltaico è il potenziale elettrico sviluppato tra due materiali dissimili quando la loro comune giunzione è illuminata con fotoni, Fig 2. 1.


Fig 2. 1 - Rappresentazione dell'effetto fotovoltaico che converte la luce del Sole in elettricità [12]; la giunzione p-n è composta da due zone, una con un eccesso di elettroni (strato n) e una ad eccedenza di lacune (strato p); il carico è qualsiasi utilizzatore che assorbe potenza.

Quando la giunzione assorbe la luce, l'energia dei fotoni assorbita è trasferita agli elettroni del materiale, provocando la creazione di portatori di carica che sono separati alla giunzione [9]. I portatori di carica saranno coppie elettroni-ioni nel caso di un liquido elettrolitico, o coppie elettronelacuna in un materiale solido semiconduttore [9]. In entrambi i casi, essi creano un gradiente di potenziale (tensione), sono accelerati sotto il campo elettrico e circolano come corrente elettrica se il circuito esterno è chiuso. Il prodotto tra tensione e corrente nel circuito è la potenza dei fotoni convertita in elettricità. La potenza che non è convertita in elettricità rimane alla giunzione aumentando la temperatura della cella [9].

Le celle fotovoltaiche sono costituite da giunzioni p-n o n-p di due semiconduttori con un terminale per ciascuna. L'origine del potenziale fotovoltaico è la differenza nel potenziale chimico (livello di Fermi) degli elettroni nei due materiali isolati. Quando questi sono messi a contatto, la giunzione conduce ad un nuovo equilibrio termodinamico, che può essere raggiunto solo quando il livello di Fermi è uguale nei due materiali [9]. Questo accade attraverso il flusso di elettroni da un materiale all'altro fino a quando una differenza di tensione è stabilita tra i due materiali, la quale è uguale all'iniziale differenza dei livelli di Fermi. L'assorbimento dell'energia dei fotoni nelle celle al silicio, ad esempio, libera un elettrone

dall'atomo, lasciando una lacuna (carica positiva). Gli elettroni liberi ritornano attraverso il circuito esterno sotto la differenza di potenziale, fornendo potenza al carico [9]. Più nel dettaglio, affinché l'elettrone si liberi, l'energia del fotone deve essere superiore alla banda proibita o *energy gap* del materiale, ossia al gap energetico tra la banda di valenza e quella di conduzione.

La cella è fondamentalmente un diodo con una superficie estesa, la giunzione è posizionata in prossimità della superficie esposta al Sole. Le prime celle erano del tipo p-n, ossia con lo strato esposto alla luce solare, tuttavia degradavano rapidamente, soprattutto se esposte alle radiazioni nelle fasce di Van Allen. Pertanto, la progettazione delle celle fu cambiata a n-p per migliorare la resistenza alle radiazioni [9].

La struttura base della cella fotovoltaica è mostrata in Fig 2. 2. I contatti metallici sono presenti su entrambi i lati della giunzione per raccogliere la corrente elettrica indotta dai fotoni incidenti sulla superficie esposta. Un foglio conduttivo o un contatto saldabile è presente su tutta la superficie inferiore non esposta e su un bordo della superficie superiore illuminata.

Una sottile griglia conduttiva sulla rimanente superficie esposta raccoglie la corrente consentendo comunque il passaggio della luce. La spaziatura dei filamenti conduttivi nella griglia è determinata dal compromesso tra la massimizzazione della conduttanza elettrica e la minimizzazione della superficie attiva della cella [9]. In aggiunta a queste caratteristiche base, diverse migliorie sono applicate alla struttura della cella [9]:

- la faccia superiore della cella ha un rivestimento antiriflesso per assorbire una maggiore quantità di luce, minimizzando la riflessione;
- la protezione contro i danni causati dalle particelle energetiche che colpiscono la superficie è realizzata tramite un vetrino di protezione (coverglass) applicato con un adesivo trasparente.



Fig 2. 2 - La struttura base della cella fotovoltaica [12]: partendo dal basso si nota il substrato, il contatto posteriore positivo esteso su tutta la superficie della cella, il semiconduttore di tipo p, la giunzione n-p, il semiconduttore di tipo n, il contatto superiore della cella disposto a forma di griglia ed il sottile strato antiriflesso, generalmente a base di ossido di titanio.

Per caratterizzare una cella fotovoltaica è necessario tracciare la sua curva caratteristica I-V (corrente-tensione). Si tratta di misurare la corrente fornita dalla cella ad una tensione determinata dall'utilizzatore (in presenza quindi di un certo carico applicato).

La curva, mostrata in Fig 2. 3, giace sul primo quadrante del piano V-I ed interseca l'asse delle ascisse nel punto (V_{oc} , 0) e l'asse delle ordinate nel punto (0, I_{sc}), dove V_{oc} e I_{sc} sono rispettivamente la tensione a circuito aperto e la corrente di cortocircuito, che rappresentano due parametri caratteristici della cella.



Fig 2. 3 - Tipica curva caratteristica di una cella fotovoltaica.

La curva è una fotografia di tutti i punti di lavoro possibili della cella, fissate le condizioni di temperatura e intensità luminosa. Osservando la curva in Fig 2. 3 è possibile fare alcune considerazioni:

- l'area compresa tra l'ascissa e l'ordinata di un punto della curva e gli assi cartesiani rappresenta la potenza elettrica erogata in corrispondenza di quei valori di corrente e tensione.
- in corrispondenza del punto della caratteristica di ordinata I_{max} e ascissa V_{max} , ossia in corrispondenza del ginocchio della curva, si ha la massima potenza ottenibile. In tale punto si hanno le condizioni di lavoro ottimale.
- il rapporto tra il prodotto I_{max} e V_{max} e il prodotto tra I_{sc} e V_{oc} è chiamato *fill factor* o fattore di riempimento della cella e fornisce un'indicazione delle prestazioni; elevati valori di questo parametro sono indicatori di migliori prestazioni della cella.

Nella Fig 2. 4 è mostrato come si modifica la caratteristica della cella fotovoltaica in corrispondenza di valori diversi della radiazione solare che investe la cella: al variare dell'irraggiamento incidente sulla cella la tensione varia di poco mentre la corrente varia in maniera proporzionale alla radiazione [9].



Fig 2. 4 - Tipiche variazioni delle curve caratteristiche in funzione della radiazione incidente sulla cella.

Anche per bassi valori della radiazione solare la tensione a vuoto assume valori molto vicini a quelli di tensione massima per cui per evitare la presenza di tensione ai morsetti di un generatore fotovoltaico bisogna oscurarne totalmente la superficie captante.

Le prestazioni della cella fotovoltaica sono inoltre influenzate dalla temperatura della cella stessa. Incrementando la temperatura, la corrente di corto circuito I_{sc} aumenta, mentre la tensione a circuito aperto V_{oc} diminuisce, come mostrato nella Fig 2. 5. I coefficienti di temperatura che esprimono la variazione della corrente di corto circuito e della tensione a circuito aperto, espressi rispettivamente in mA/°C e mV/°C sono caratteristici di ogni tipologia di cella [9]. Per una cella al silicio monocristallino, un incremento di 1°C della temperatura comporta un decremento dello 0.50% della potenza in uscita dalla cella [9].



Fig 2. 5 - Tipiche variazioni delle curve caratteristiche in funzione della temperatura della cella.

Riassumendo mentre la temperatura influenza la tensione, l'irraggiamento determina la corrente del dispositivo fotovoltaico.

Una delle più importanti misure delle prestazioni della cella fotovoltaica è l'efficienza di conversione, η , della cella fotovoltaica definita come:

$$\eta = \frac{potenza \ elettrica \ prodotta}{potenza \ luminosa \ incidente}$$
(2.1) [9]

E' pertanto necessario sviluppare e progettare celle solari in grado di convertire l'energia incidente con la maggiore efficienza possibile. Se ciò non fosse, le dimensioni dei pannelli solari diventerebbero enormi, con un aggravio dei costi e nel caso di pannelli dispiegabili, con un più complesso meccanismo di apertura [12]. La continua ricerca di produrre celle a basso costo e ad elevata efficienza ha avuto come risultato la disponibilità sul mercato di differenti tipi di tecnologie fotovoltaiche, i cui maggiori tipi sono [9]:

- celle in silicio mono e policristallino;
- film in silicio amorfo;
- celle CIS (Copper Indium Diselinide) al diseleniuro di rame e di indio;
- celle CIGS (Copper Indium Galliunm Diselinide) al diseleniuro di rame, indio e gallio;
- celle GaAs, all' arseniuro di gallio;
- celle a giunzioni multiple.

Per rispondere all'esigenza di rendere più compatti i generatori solari spaziali che è stata sviluppata, negli anni '80, una nuova generazione di celle solari, basata sull'arseniuro di gallio (GaAs), in grado di convertire la radiazione solare con efficienza prossima al 30% [13]. Le celle solari tradizionali, realizzate con silicio monocristallino, convertono la radiazione incidente con efficienza di circa il 15%, ma questo valore rappresenta probabilmente un limite della tecnologia del silicio. Le celle solari al GaAs permettono, a parità di potenza, di ridurre l'area dei pannelli di metà in condizioni operative o di fornire, a pari area, una potenza doppia rispetto al silicio alle temperature di utilizzo ed una migliore resistenza alle radiazioni, che permette di allungare la vita del satellite oltre i 10 anni in orbita geostazionaria [13]. Le celle al GaAs sono circa cinque volte più costose di quella al silicio, per via della tecnica di produzioni, ma i vantaggi che si ottengono a livello di sistema le rendono molto competitive.

Esistono attualmente due tipologie di celle solari al GaAs: le celle a singola giunzione, caratterizzate da un efficienza del 19-20%, e le celle a tripla giunzione (o multigiunzione), caratterizzate da un efficienza superiore al 25% con valori anche del 30%. Le risposte spettrali delle due tipologie sono confrontare nella Fig 2. 7 [13].

La struttura base delle celle a tripla giunzione è mostrata in Fig 2. 6. Le tre giunzioni, che convertono le diverse parti dello spettro solare, sono tra loro collegate in serie da "diodi tunnel".

La giunzione superiore, realizzata con InGaP, assorbe e converte la radiazione blu dello spettro solare. La restante radiazione viene trasmessa alla giunzione intermedia, realizzata in GaAs, che converte in particolare la parte visibile dello spettro solare. Infine, la radiazione infrarossa raggiunge la terza giunzione realizzata in germanio [13]. Le tre giunzioni, collegate in serie, devono essere ottimizzate in modo da produrre all'incirca la stessa corrente in modo da non penalizzare l'efficienza di conversione complessiva [12].

Le celle solari a tripla giunzione sono caratterizzate da una tensione che è data dalla somma delle tensioni delle tre sotto-celle [12], mentre la corrente generata è invece quella della sotto-cella con la corrente inferiore (da cui il

motivo di rendere uguali le correnti erogate da ciascuna sotto-cella, per non penalizzare l'efficienza) [12].



Fig 2. 6 - Celle fotovoltaiche a tripla giunzione: la struttura (sinistra), il circuito equivalente della cella (centro), lo spettro solare convertito da ogni giunzione (destra) [12][13].



Fig 2. 7 - Comparazione della risposta spettrale di una cella a singola giunzione e una a tripla giunzione [13].

2.3 Le celle fotovoltaiche Azur Space 3G30C

Le celle fotovoltaiche utilizzate in questo lavoro e fornite gratuitamente da GAUSS Srl, sono celle a tripla giunzione prodotte dalla Azur Space [14].

Le celle 3G30C sono celle a tripla giunzione GaInP/GaAs/Ge su un substrato di germanio [14].

L'efficienza dichiarata è del 30%. Le dimensioni della cella sono mostrate in Fig 2. 8 [14].

Queste celle sono caratterizzate da un particolare disegno della griglia e sono equipaggiate con un diodo di bypass integrato (cosi come verificato in test interni) il quale protegge la cella adiacente nella stringa. Lo schema elettrico del collegamento tra cella e diodo è mostrato in Fig 2. 9.



Fig 2. 8 - Dimensioni della cella Azur Space 3G30C [14].



Fig 2. 9 - Schema elettrico della cella e del diodo di by-pass integrato. Con N è identificata la superficie superiore della cella, con P quella inferiore. Il diodo di by-pass integrato deve essere collegato con il contatto positivo della cella successiva, pertanto la prima cella della stringa ha bisogno di un diodo di bypass esterno.

Le principali caratteristiche di queste celle sono riassunte nella Ta	abella 2.
1 [14].	

Dati meccanici				
Materiale base		GaInP/C	GaAs/Ge su subs	strato di Ge
Rivestimento antirifl	esso	TiO _x /Al	$_2O_3$	
Dimensioni	Dimensioni $26.4 \times 80 \pm 0.1 \text{mm}$			
Area della cella	Area della cella 19.30 cm^2			
Spessore (senza i contatti) $150 \pm 20 \mu\text{m}$				
Spesso dei contatti (Ag/Au) 4 - 10 µm				
Caratteristiche della griglia Griglia con 3 contatti				
Dati elettrici				
	BOL	2.5E14	5E14	1E15
$V_{oc}[mV]$	2700	2573	2522	2480
$I_{sc}[mA](*)$	333.3	331.62	329.89	312.43
$V_{mp}[mV]$	2411	2283	2232	2198
$I_{mp}[mA](*)$	323.16	320.92	316.63	306.82
$\eta_{\text{bare}} (1367 \text{W/m}^2)$	29.5	27.7	26.7	25.5
$\eta_{\text{bare}} (1353 \text{W/m}^2)$	29.8	28	27	25.8

Tabella 2. 1 - Caratteristiche meccaniche ed elettriche delle celle Azur Space 3G30C. I valori sono determinati con uno spettro AM0 e alla temperaturaT=28°C. (*) I valori delle correnti riportati nella tabella, sono ottenuti scalando con l'area i valori della corrente riportati nel data sheet di riferimento [14] i quali si riferiscono a celle di dimensioni 40 x 80 \pm 0.01mm

2.4 Pannelli fotovoltaici

I pannelli fotovoltaici sono costituiti da celle fotovoltaiche, installate su un substrato, opportunamente collegate in serie o parallelo, per rispondere ad una determinata richiesta di potenza. Possono essere sinteticamente raggruppati nei seguenti tipi principali [9]:

- pannelli dispiegabili (*deployable*), costituiscono il metodo di costruzione tradizionale, in cui le celle sono montate su un substrato rigido in nido d'ape d'alluminio con le facce di alluminio e lamine di fibre rinforzanti come Nomex e Kevlar. Le celle sono fissate sul pannello tramite adesivi. Questi pannelli sono inizialmente aderenti al corpo del satellite durante il lancio, quindi aperti una volta in orbita. Sono utilizzati principalmente per satelliti stabilizzati a tre assi, e nei satelliti di grandi dimensioni possono essere orientabili. Possono dissipare calore dalla superficie inferiore, ma richiedono meccanismi e strategie di spiegamento. I pannelli dispiegabili hanno anche la funzione secondaria al termine della vita di incrementare la resistenza del satellite e favorire il *de-orbiting*;
- pannelli fissi (*body mounted*), trovano principale applicazione nei piccoli satelliti. Le celle in genere sono montate sulla superficie del satellite senza usare un substrato a nido d'ape intermedio. Economici, senza particolari requisiti di controllo d'assetto, non sono orientabili. Non può dissipare calore dalla superficie inferiore, raggiungono temperature operative più alte, anche se le fluttuazioni termiche sono inferiori rispetto ad un pannello dispiegabile;
- pannelli flessibili, costruiti installando le celle fotovoltaiche su un tessuto di Kevlar, permettono di ridurre la massa dei pannelli. Il pannello è piegato quando stivato ed è aperto come una fisarmonica o srotolato. Esiste un altro tipo di pannelli flessibili, ossia dei pannelli gonfiabili composti da celle fotovoltaiche flessibili a film sottile montate su una struttura composita flessibile, impacchettate per il lancio e dispiegata nello spazio tramite un gas.

I principali fattori che influenzano le prestazioni dei pannelli fotovoltaici sono [9]:

- intensità della radiazione solare, la curva caratteristica IV shifta verso il basso man mano che intensità del sole diminuisce. La tensione a circuito aperto diminuisce poco ed in ogni caso l'efficienza di conversione rimane quasi invariante [9];
- angolo di incidenza dei raggi solari, la corrente di cortocircuito diminuisce con il coseno dell'angolo tra la normale al pennello e la direzione dei raggi asintotici [9];
- effetti della temperatura, con l'incremento della temperatura, la corrente di cortocircuito incrementa, mentre il voltaggio a circuito aperto diminuisce, ma con rapporti differenti; l'incremento della corrente è minore del decremento del voltaggio, pertanto la potenza decresce con l'aumento della temperatura [9].

Il design del pannello, è determinato dalla potenza che deve generare alla fine della vita. Questa deve eguagliare la somma dei carichi, delle perdite di potenza e della potenza richiesta per caricare la batteria. Le celle fotovoltaiche sono suddivise in diverse stringe connesse fra loro in parallelo. Le relazioni 2.2-2.4 permettono di determinare il numero di celle necessario per rispondere ad una determinata richiesta di potenza [9]:

$$N_{celle in serie per stringa} = \frac{V \, della \, serie}{V_{max}} \tag{2.2}$$

$$N_{stringhe \ per \ circuito} = \frac{I_{circuito}}{I_{mn}} \tag{2.3}$$

$$N_{circuiti \, paralleli} = \frac{I \, dell'array}{I_{circuito}} \tag{2.4}$$

dove N denota un numero e V_{mp} e I_{mp} sono rispettivamente il voltaggio della cella e la corrente della cella nel punto di massima potenza.

La corrente in uscita da ogni serie di celle e quella diretta al bus di potenza transita tramite un diodo di blocco che ha la funzione di evitare che correnti inverse provengano dal bus o da altre stringhe di celle collegate in parallelo, in caso di un parziale o totale oscuramento di una stringa. I principali metodi di regolazione della potenza del pannello solare sono [9]:

- DET (*Direct Energy Transfert*): prende la potenza ad un predeterminato punto di voltaggio sulla curva I-V della cella solare ed utilizza un bando di resistori shunt per dissipare la potenza in eccesso. Molto semplice, efficace per missioni di lunga durata, necessità però di un sistema di controllo termico per rigettare la potenza termica prodotta per effetto Joule e lavora lontano dal punto di Massima potenza;
- PPT (*Peak Power Tracking*): è un sistema non dissipativo, estrae dinamicamente dal pannello solare la potenza istantanea richiesta, fino al valore massimo. Utilizza un convertitore DC/DC in serie al pannello solare per rendere i livelli V -I compatibili con i requisiti del bus. E' più pesante e meno efficiente del sistema DET. E' vantaggioso per missioni di breve durata;
- MPPT (*Maximum Power Point Tracking*): dispositivo elettronico d'interfaccia posto tra il carico e il pannello. Al variare delle condizioni esterne (temperatura, irraggiamento) l'inseguitore varia il suo punto di lavoro, in modo da estrarre dal generatore sempre la massima potenza disponibile e cederla al carico. Sistema molto complesso.

La Fig 2. 10 riassume l'utilizzo di celle solari e metodi di regolazione della potenza per pico- e nanosatelliti [15].



Fig 2. 10 - Tipi di celle solari e metodi di conversione della potenza usati nei pico e nano-satelliti.

3

PROGETTAZIONE DEL PANNELLO

Nel presente capitolo viene affrontata la progettazione del pannello fotovoltaico. Nella prima parte si presentano gli obiettivi di sviluppo considerati ed i requisiti imposti dall'applicazione su UniSat5. Sono quindi indicate le scelte progettuali che ne conseguono, la scelta dei componenti individuati per rispondere a tali requisiti ed il disegno del circuito stampato che rappresenta il supporto meccanico di tutto il pannello.

3.1 Requisiti di progetto

Il primo passo per la progettazione di un pannello solare per applicazioni su piccoli satelliti è la definizione dei requisiti. Tali requisiti sono stati definiti assieme all'integratore di sistema per l'applicazione, in questo caso, su UniSat 5. Le principali specifiche individuate sono:

- costi contenuti;
- bassa tecnologia di produzione;

- flessibile in termini di riproducibilità e di adattabilità a differenti superfici;
- basso indice di degassamento

L'applicazione del pannello fotovoltaico su UniSat5 ha imposto ulteriori requisiti in funzione della missione, dell'ambiente operativo e dell'interfaccia meccanica ed elettrica con il satellite. Ulteriori specifiche per il caso in considerazione sono quindi:

- peso massimo di 500g;
- spessore totale del pannello, inclusi i componenti a montaggio superficiale, minore di 5mm;
- dimensioni massime di circa 315mm x 315mm, con 4 fori passanti di diametro pari a 25mm per escludere le superfici di centraggio tra satellite e lanciatore ed un foro centrale di diametro pari a 95mm per escludere l'interfaccia tra satellite e lanciatore, così come indicato in Fig 3.1;
- fori di fissaggio per viti M3, da disporre non lungo le diagonali del pannello, così come indicato in Fig 3.1;



Fig 3.1 - Rappresentazione della superficie massima occupabile dal pannello e delle aree in cui prevedere i fori di fissaggio del pannello.

- tensione a circuito aperto (V_{oc}) di 50V;
- basso degassamento del pannello;
- termocoppie, di tipo J, per monitorare la temperatura in un solo punto del pannello;
- assenza di fili sulla superficie del pannello e componenti su un'unica faccia;
- temperature operative tra -55° C e $+120^{\circ}$ C.

Alcuni di questi requisiti sono tra loro dipendenti. In particolare, le dimensioni massime, la tensione a circuito aperto richiesta e le specifiche celle solari a disposizione determinano la necessità di collegare almeno 20 celle in serie.

3.2 Scelte progettuali

L'obiettivo di contenere i costi di progetto e produzione del pannello, oltre a concretizzarsi con la scelta di componenti relativamente economici, determina la scelta di implementare una protezione per le celle solari fornite "nude" dal produttore. Parte del progetto e della produzione si è quindi concentrata sull'applicazione di un vetrino di protezione (coverglass) applicato in casa, dato il costo significativamente maggiore di celle gia dotate di coverglass. Inoltre il vetrino può essere applicato mediante la tecnologia del sacco a vuoto opportunamente modificata ed adattata. I costi possono essere ulteriormente contenuti utilizzando un nastro per uso fotovoltaico terrestre (ribbon) come interconnettore per le celle, invece di connettori in invar con rivestimento in argento, molto più costosi.

Dal punto di vista tecnologico, l'elemento più critico è il fissaggio delle celle al pannello. Tipicamente vengono utilizzate resine epossidiche o la parte posteriore della cella viene saldata direttamente sul pannello. Entrambi i metodi richiedono tempi di cura precisi, alte temperature e la necessità di fissare preventivamente le celle per evitare disallineamenti durante le varie operazioni. In un'ottica di bassi costi e limitata complessità tecnologica, l'alternativa individuata per fissare le cella al pannello è l'utilizzo di un nastro biadesivo a volatilità controllata [16]. Questo metodo non richiede specifici tempi di cura, non introduce i problemi relativi ad una non corretta preparazione della resina, non espone l'intero pannello ad elevate temperature ed è di facile preparazione ed esecuzione.

Per rispondere al criterio di flessibilità e adattabilità del progetto a differenti situazioni, è stato adottato l'utilizzo di un circuito stampato (PCB) sia per connettere le celle tra di loro e con gli altri componenti elettrici, ma anche come supporto meccanico del pannello. Questa scelta permette di sfruttare al meglio le superfici del satellite, per produrre potenza elettrica, poiché attraverso un appropriato disegno del PCB è possibile collegare le celle tra loro nonostante queste non siano allineate e senza la presenza di fili che corrono sulla superficie del pannello.

Il progetto preliminare, pertanto, si è orientato su un pannello fotovoltaico costituito da un circuito stampato sul quale sono incollate, con un nastro biadesivo a volatilità controllata, le celle. I contatti con il circuito stampato si intendono realizzare con ribbon per uso terrestre e le celle sono protette con vetrini installati su ciascuna cella con la tecnica del sacco a vuoto. Sono di seguito analizzati i componenti utilizzati per la realizzazione del pannello.

3.3 Vetrini di protezione

I vetrini di protezione sono utilizzati per proteggere le cella dall'ambiente spaziale, dove radiazioni, ossigeno atomico e particelle ionizzate possono danneggiare la funzionalità e le prestazioni della cella stessa.

In genere le aziende che si occupano di installare le protezioni sulle celle non coincidono con i produttori delle celle stesse [17].

In virtù dello spettro di radiazione solare convertito in energia dalle celle e in particolare dalle celle a tripla giunzione [12], le principali caratteristiche desiderate dai vetrini di protezione [18] sono:

- antiriflesso e non assorbenti nell'intervallo delle lunghezze d'onda tra i 400nm e i 1200nm;
- elevata emissività nelle lunghezze d'onda superiori ai 500nm;
- riflettenti per il resto dello spettro elettromagnetico;
- spessore sufficiente per essere resistenti alle radiazioni esterne ed in grado di fornire la giusta protezione alle celle;
- resistenti ad elevati sbalzi termici;
- assorbenti della radiazione ultravioletta (UV).

Un vetro in borosilicato drogato con ossido di cerio risponde a questi requisiti [18][19][20].

Il vetro borosilicato è noto per le sue qualità di resistenza agli sbalzi termici e per il suo basso coefficiente di dilatazione termica. Viene prodotto mediante la sostituzione degli ossidi alcalini da parte dell'ossido di boro nel reticolo vetroso della silice.

L'ossido di cesio (CeO₂) aggiunto al vetro consente l'assorbimento selettivo della luce ultravioletta, proteggendo pertanto il collante tra il vetrino e la cella dall'ingiallimento tipico delle resine epossidiche che causa una diminuzione della trasmissività del collante e quindi, in aggiunta al danneggiamento della cella a causa della radiazione UV anche un'ulteriore calo delle performance.

I vetrini di protezione utilizzati nella realizzazione del pannello sono stati forniti come campioni gratuiti dalla Qioptiq [20].

In particolare sono stati utilizzati i vetrini di tipo CMG 150 (Cerium Microsheet Glass) [21], che sono prodotti a partire da un vetro molto sottile drogato con ossido di cesio al quale è applicata una copertura antiriflesso e le cui proprietà sono riassunte nella Tabella 3. 1 [21].

Minimum Coverg	lass Transmission s	pecifications with 0.1	0mm thick CMG
350-400nm	400-450nm	450-700nm	600- 800nm
83.5	93.0	96.5	96.5
650 - 900nm	450- 1100nm	IR Cut-off	Min Emittance
96.5	95.0	1315+/-35nm	0.86
Proprietà fisiche			
Density	Refractive	Youngs	Poissons ratio
	index	modulus	
2.554 g/cm^3	1.516	77GNm ⁻²	0.20

Tabella 3.1 - Proprietà dei vetrini CMG

Le dimensioni dei campioni ottenuti, riassunte in Fig 3. 2, sono 80mm x 40mm con due smussi 13.5x45°.



Fig 3. 2 - Dimensioni originali dei vetrini di protezione.

Lo spessore dei campioni avuti è di circa 0.15mm ed il peso circa 1.22g. Su uno spigolo dei vetrini è visibile una macchia di inchiostro nero, che serve ad individuare la superficie sulla quale è stato condotto il trattamento antiriflesso, come mostrato in Fig 3.3.



Fig 3. 3 - Vetrino originale con il riferimento antiriflesso visibile in alto a destra.

Le dimensioni dei campioni di vetrini sono maggiori di quelle della cella, indicate nel Paragrafo 2.3, pertanto con l'ausilio di una penna a punta diamantata l'altezza è stata manualmente ridotta da 40mm a 26.4 mm.

Sulla superficie attiva della cella sono presenti i contatti negativi e il diodo integrato [14], pertanto è necessario lasciare questi liberi dalla copertura per poter essere accessibili successivamente per la saldatura.

Il costo di questi vetrini è pari a circa 8€ ciascuno e la realizzazione dei tagli per escludere i contatti e il diodo integrato comporta un costo aggiuntivo pari a 800€ su un intero ordine. Per questo motivo, al fine di risparmiare sui costi di produzione, anche questi tagli sono stati realizzati in casa utilizzando la penna a punta diamantata. Il risultato finale è mostrato in Fig 3. 4.



Fig 3. 4 - Il vetrino originale (sinistra) e quello definitivo (destra).

3.4 Adesivi per l'incollaggio delle celle e dei vetrini

A seguito di un'analisi dei possibili adesivi e con l'intento di limitare i costi è stato scelto di utilizzare un nastro biadesivo per l'incollaggio delle celle sul circuito stampato ed una colla per vuoto per l'incollaggio dei vetrini di protezione sulle celle. Entrambi i prodotti scelti sono di natura siliconica per la capacità di assorbire e compensare elasticamente gli stress meccanici dovuti a forze dinamiche e a diverse dilatazioni termiche. In aggiunta, la resistenza alle alte temperature e il basso valore di degassamento sono stati fattori determinanti per la scelta dei seguenti prodotti della NuSil Technology LCC [22]:

- nastro biadesivo a volatilità controllata, CV4-1161-6, per fissare le celle al circuito stampato [23];
- collante siliconico a volatilità controllata CV15-2500P [24] in combinazione con il primer CF1-135 [25], per incollare i vetrini di protezione sulle celle.

3.4.1 Nastro biadesivo CV4-1161-5P

Il CV4-1161-5P è un nastro biadesivo in foglio di Kapton® con adesivo sensibile alla pressione (PSA) siliconico su entrambe le facce, prodotto dalla NuSil Technology LCC.

Il PSA è un silicone a volatilità controllata, in accordo con i livelli di outgassing stabiliti dalla normativa ASTM E-595 per applicazioni nello spazio. I valori del Total Mass Loss (TML) e del Collected Volatile Condensable Material (CVCM) sono indicati nella Tabella 3. 2.

Proprietà	Valore medio	ASTM
CVCM	0.02%	E 595
TML	0.50%	E 595
Taballa 2 2 Duanuistà dal	CVA 11(1 5D	

Tabella 3. 2 Proprietà del CV4-1161-5P

Il nastro è progettato per resistere a temperature (da -115°C a +260°C) [16] e variazioni di pressione estreme. E' isolante elettricamente e termicamente, per via della presenza del Kapton® spesso 0,0508mm [16]. Lo spessore totale del nastro è pari a 0.127mm [16].

Il nastro si presenta come un foglio di dimensione 20.32 x 25.4 cm ed è facilmente tagliabile con un bisturi di precisione o con delle forbici, come mostrato in Fig 3. 5.



Fig 3. 5 - Taglio del nastro biadesivo utilizzando una dima sagomata come le celle e dotata di intagli per lasciare liberi i contatti per le saldature.

Il costo di ogni singolo foglio è pari a 294€. Per questo progetto sono stati utilizzati due fogli di CV4-1161-5P, uno per ogni prototipo realizzato. Uno dei fogli è stato gentilmente concesso come campione gratuito dalla NuSil Technology LCC.

3.4.2 Silicone CV15-2500P

Il CV15-2500P è un silicone a volatilità controllata, per applicazioni che richiedono basso TML e CVCM. E' utilizzato per proteggere componenti elettronici da condizioni estreme di umidità, radiazioni, stress termici e meccanici. Per la sua trasparenza e bassa volatilità, così come indicato nella Tabella 3. 3, è ideale come adesivo per l'applicazione dei vetrini sulle celle solari.

Proprietà	Valore medio	ASTM
CVCM	0.01%	E 595
TML	0.05%	E 595

Tabella 3. 3 - Proprietà del CV15-2500P

Oltre a resistere ad alte temperature senza degradazione apprezzabile delle sue proprietà, presenta una notevole flessibilità anche in condizioni di temperature basse estreme (-50°C/-70°C). Essendo di natura siliconica, a differenza delle resine epossidiche, presenta una forte resistenza all'ingiallimento sotto esposizione alla radiazione ultravioletta. Questo è un fattore molto importante, poiché l'ingiallimento influisce sulla degradazione delle prestazioni delle celle.

Il CV15-2500P si presenta in due componenti che vanno miscelati in rapporto di peso 1:1 e successivamente deareato in una comune campana a vuoto. La Fig 3. 6 mostra la preparazione della colla a partire dai due componenti.



Fig 3. 6 - La fase di preparazione della colla: i due componenti della colla visibili in alto a sinistra sono stati miscelati in rapporto di massa 1:1 ed è in corso la deareazione nella campana a vuoto.

E' richiesto un minimo tempo di cura ad una temperatura relativamente bassa: 45 minuti a 75°C. Per preparare le superfici all'incollaggio e migliorarlo, è stato usato in combinazione alla colla il primer siliconico CF1-135, mostrato in Fig 3. 7.



Fig 3. 7 - Il primer CF1-135.

Questo primer si attiva con l'umidità ed asciuga in aria in circa 30minuti [25].

Il costo di 100g di CV15-2500P è di circa 390€, occorrono 6g per incollare 20 vetrini di protezione. Il primer invece ha un costo di 54€ per 180g.

3.5 Ribbon per uso fotovoltaico

Il collegamento elettrico tra le celle è in genere realizzato su pannelli solari per uso spaziale tramite connettori di invar, che è una lega metallica composta principalmente di ferro (64%) e nichel (36%), ricoperti da argento. Questi connettori hanno, tuttavia, un costo elevato e non sono facilmente reperibili; infatti, i produttori di celle fotovoltaiche per uso spaziale tendono a vendere le celle già dotate dei relativi connettori.

L'equivalente dei connettori in invar per applicazioni fotovoltaiche terrestri, è un ribbon più economico e facilmente reperibile. Questo è costituito da uno strato di rame ricoperto da una lega di stagno su entrambi i lati. Lo stagno costituisce parte del materiale di apporto durante la saldatura, favorendone pertanto la buona riuscita. Lo spessore e la larghezza del ribbon sono stati scelti in virtù delle seguenti esigenze:

- la larghezza della piazzola sulla cella è di 7mm, pertanto la larghezza del ribbon dovrà essere necessariamente inferiore;
- una striscia di ribbon dovrà essere saldata sul retro della cella solare per poter collegare il polo positivo della stessa al circuito stampato e poiché la cella sarà incollata sul circuito tramite il nastro biadesivo il cui spessore è di 0,127mm, lo spessore del ribbon dovrà essere minore.

Il ribbon utilizzato è prodotto dalla tedesca Schlenk di cui la RBMetalli è il rappresentante italiano [26]. Lo spessore è di 0.10mm, mentre la larghezza è di 2mm. E' stagnato per placcatura su entrambi i lati con una lega di Sn62Pb36AG2 e lo spessore della stagnatura è circa il 13% per lato dello spessore totale (circa 13 m μ) [27].

Il costo totale di una bobina da 630m, mostrata in Fig 3. 8, è di 80€ e per questo progetto è stata fornita gratuitamente dalla Schlenk.



Fig 3. 8 - La bobina di ribbon.

3.6 Diodi di blocco e bypass

Le celle fotovoltaiche devono essere protette da fenomeni di riscaldamento locale (*hot spot*) che possono insorgere quando una cella è parzialmente oscurata e costretta a funzionare in polarizzazione inversa [28] e da correnti inverse che potrebbero scorrere dal bus di potenza in caso di un parziale o totale oscuramento del pannello, causando anche in questo caso un indesiderato riscaldamento eccessivo che comprometterebbe, anche definitivamente, le funzionalità della cella e la perdita di efficienza del pannello.

E' pertanto necessario inserire nel circuito due tipologie di diodo:

 diodi di bypass per proteggere la cella oscurata dal fenomeno di hot spot; • diodo di blocco per proteggere il pannello da correnti inverse provenienti dal bus di potenza del satellite in caso di totale o parziale oscuramento del pannello, come nelle fasi di eclissi.

Nonostante la presenza di un diodo integrato nelle celle, per completezza di progetto e per garantire sufficiente ridondanza, si è deciso di inserire un diodo di bypass in antiparallelo con ogni singola cella. I requisiti con i quali sono stati scelti i diodi sono:

- massima temperatura operativa 175°C;
- minima temperatura operativa -55°C;
- altezza massima di 2mm;
- montaggio superficiale;
- per il diodo di blocco che è sempre in conduzione, la corrente diretta I_F che è al massimo di 330mA opportunamente sovradimensionata di un fattore 5;
- per il diodo di blocco, la massima tensione inversa V_{RRM} di 50 V sovradimensionata di almeno un fattore 4;
- per il diodo di bypass, la tensione diretta in funzione della corrente diretta.

I diodi Vhisay ESH2PD [29], rappresentati in Fig 3. 9, rispondono a tutti i requisiti elencati e per questo sono stati usati nella duplice funzione di diodo di blocco e diodo di bypass. Il costo di ciascun diodo è di 0,383€.



Fig 3. 9 - Le dimensioni principali dei diodi in millimetri.

Le principali caratteristiche di questi diodi sono riassunte nella Tabella 3. 4 [29].

Proprietà dei diodi Vhisay ESH2PD			
$\mathbf{I_F}$	V _{RRM}	T _{min}	T _{max}
2A	200V	-55°C	+175°C

Tabella 3. 4 - Principali proprietà del diodo.

3.7 Termocoppie di tipo J

La misura della temperatura del pannello nelle condizioni operative è un dato significativo per valutarne le prestazioni. Per misurare la temperatura del pannello, è stato richiesto l'uso di una singola termocoppia di tipo J.

Nelle termocoppie di tipo J i conduttori elettrici che compongono la giunzione sono ferro e costantana. Queste termocoppie sono caratterizzate da una notevole sensibilità, 51.7 μ V/°C, e il range di temperatura varia da - 50°C a +750°C [30]. Le termocoppie sono state scelte in base al costo e al materiale di isolamento dei conduttori. Si tratta di termocoppie prodotte da RS Components S.p.A, dal costo di 6.64€, con isolamento in teflon (PFTE).

3.8 Circuito stampato

Il circuito stampato (PCB) svolge la duplice funzione di supporto meccanico e di collegamento elettrico fra le celle e i diodi.

Nel campo aeronautico e spaziale, il materiale più comune utilizzato per realizzare circuiti stampati è l'FR4 per le sue buone proprietà termiche, elettriche e meccaniche. E' composto da un tessuto di fibre di vetro impregnato di una resina epossidica [31] [32].

3.8.1 Requisiti meccanici ed elettrici

Il disegno e lo sviluppo del PCB dipendono principalmente dai requisiti derivanti dall'applicazione del pannello su UniSat-5, sono indicati nel paragrafo 3.1.

Le dimensioni massime e i fori necessari per escludere le superfici di interfaccia tra il satellite e il lanciatore, insieme al vincolo elettrico (tensione di circuito aperto V_{oc} =50V) necessario per collegare il pannello al bus principale di potenza del satellite, raggiungibile collegando in serie 20 celle, sono i requisiti che hanno maggiormente condizionato il disegno del circuito stampato.

3.8.2 Sviluppo del circuito stampato e scelte progettuali

Nello sviluppo del disegno del circuito stampato le scelte iniziali sono state le seguenti:

- spessore del circuito stampato pari a 2.4mm per garantire la dovuta resistenza meccanica;
- spessore dello strato di rame pari a 35μm;
- ridondanza dei collegamenti elettrici tra la cella e il circuito stampato, in particolare due collegamenti per il contatto positivo e due collegamenti per il contatto negativo;
- simmetria del pannello per eliminare vincoli di montaggio del pannello sul satellite;

- larghezza cautelativa delle piste pari a 1.24mm, dimensionate quindi per condurre una corrente di 10A in aria (circa 30 volte maggiore di quella nominale);
- distanza minima cautelativa tra le piste di 1.24mm, dimensionate quindi per una tensione fino a 350V in aria (circa 7 volte maggiore di quella nominale);
- applicazione di una vernice verde (solder resist) sulle piste esposte per proteggerle dall' ossidazione e dall'ambiente esterno.

In antiparallelo ad ogni cella sarà montato un diodo di bypass e al termine della stringa un diodo di blocco montato in serie. I diodi integrati dovranno invece essere collegati con il polo positivo della cella successiva, così come indicato in Fig 2. 9.

Lo schema elettrico del pannello è pertanto quello mostrato in Fig 3.10.



Fig 3.10 - Schema elettrico del circuito stampato.

Durante il disegno del circuito stampato è stata condotta una prova sperimentale in cui si è verificato il corretto funzionamento e collegamento dei diodi di bypass esterni e si è valutata la difficoltà a saldare il ribbon con la distanza imposta tra i contatti delle celle e le piazzole sul circuito stampato, così come mostrato in Fig 3. 11.



Fig 3. 11 - Test elettrici e prove di saldatura su una coppia di celle collegate secondo la configurazione di progetto.

Visto l'esiguo numero di piste, per risparmiare sui costi e per semplicità di progetto si è deciso di realizzare il circuito a singola faccia.

Nel corso dello sviluppo del disegno del circuito stampato sono state prese in considerazione le seguenti modifiche:

- nonostante lo spessore del ribbon è inferiore allo spessore del nastro biadesivo, per essere cautelativi sono state previste della scanalature di 1mm nel PCB nella posizione in cui sarà realizzata la saldatura posteriore della cella;
- per collegare fra di loro le due piazzole a cui sono saldati i potenziali positivi della stessa cella, per evitare la presenza di piste sotto l'area in cui sarà incollata la cella, poiché queste provocherebbero una disomogeneità di spessore, il collegamento avviene tramite un'unica piazzola sotto la cella, che sarà utilizzata anche come riferimento per l'incollaggio.

In ultimo, nel disegno del circuito stampato, sono state previste le piazzole su cui predisporre la termocoppia di tipo J e sono stati introdotti i fori di fissaggio, che in rispetto dei requisiti meccanici imposti dall'applicazione del pannello su UniSat-5, sono stati messi lontano dalle diagonali del pannello. Uno di questi fori è utilizzato come massa.

Infine, sono stati approntati tre fori di diametro 0.2mm da cui far passare il filo della termocoppia e il contatto positivo e negativo del pannello.

Lo schema progettuale del PCB è mostrato nella Fig 3. 12, mentre la Fig 3. 13 presenta una foto del prototipo realizzato.



Fig 3. 12 - Layout del circuito stampato, con indicate le dimensioni esterne.



Fig 3. 13 - Foto del circuito stampato, in cui sono evidenti le scanalature e la piazzole su cui sarà incollata la cella solare.

Il costo complessivo di 4 schede è di 255€ ed il peso di ciascun circuito stampato è di 394g.
COSTRUZIONE DEL PANNELLO

Nel presente capitolo sono descritte la procedura e le tecniche di costruzione del pannello fotovoltaico. Una breve introduzione sulle fasi principali della procedura è seguita da una descrizione dettagliata delle operazioni condotte. Sono quindi evidenziate, ove presenti, le criticità emerse durante la realizzazione del primo prototipo e come sono state risolte durante la costruzione del secondo prototipo, che rappresenta l'unità di volo.

4.1 Introduzione

La costruzione del pannello fotovoltaico è stata condotta nei laboratori di Alta SpA; in particolare alcune operazioni che richiedevano specifiche condizioni ambientali e di pulizia sono state svolte in una camera pulita di classe 100,000.

I passi in cui è suddivisa la costruzione del pannello sono:

• saldatura dei contatti positivi della cella;

- saldatura dei diodi sul circuito stampato;
- taglio dei vetrini di protezione, sia per la riduzione in altezza da 40mm a 26.4mm sia per la realizzazione degli scassi in corrispondenza dei due contatti negativi utilizzati ed in corrispondenza del diodo integrato;
- taglio del foglio di nastro biadesivo in parti delle stesse dimensioni delle celle. Anche in questo caso sono stati realizzati alcuni scassi nelle aree in cui sono saldati i ribbon nel contatto posteriore;
- installazione delle celle sul circuito stampato tramite il nastro biadesivo;
- saldatura dei collegamenti tra i contatti negativi delle celle, il diodo integrato, il ribbon proveniente dal retro della cella e le corrispettive piazzole sul circuito stampato;
- incollaggio dei vetrini di protezione sulle celle tramite la tecnica del sacco a vuoto;
- saldatura della termocoppia e dei fili terminali di collegamento.

Sono di seguito illustrate le precedenti operazioni più in dettaglio.

4.2 Saldatura del contatto posteriore della cella

La prima operazione è la saldatura del ribbon sul retro della cella solare, il quale è un unico esteso contatto positivo. In particolare sono saldati due contatti, per garantire la dovuta ridondanza.

A seguito delle operazioni di saldatura, un test elettrico di misurazione della tensione a circuito aperto (V_{oc}) è effettuato per verificare la funzionalità della cella. La tensione misurata è registrata insieme al numero identificativo della cella, per individuare una eventuale diminuzione delle prestazioni in seguito alle successive operazioni, in particolare dopo le successive saldature.

Per facilitare l'operazione, è stata predisposta una maschera in cui inserire la cella e sulla quale sono lasciate accessibili le aree destinate alla saldatura, come mostrato nella Fig 4. 1 e nella Fig 4. 2.



Fig 4. 1 - La cella è posizionata all'interno della maschera realizzata per la saldatura, quando la parte inferiore della maschera è chiusa, sono visibili solo le aree destinate alla saldatura.

Il ribbon prima di essere posizionato sulla cella, viene preformato e piegato per evitare che residui della successiva saldatura del ribbon sul PCB possano creare il cortocircuito della cella.

Sulle aree da saldare viene deposta una pasta saldante e quindi con un saldatore ad aria viene realizzata la saldatura, così come mostrato in Fig 4. 2.



Fig 4. 2 - Il ribbon è posizionato sulla superficie su cui sarà saldato e si procede alla saldatura con il saldatore ad aria (l'ugello è visibile nella parte alta dell'immagine).

Attraverso un solvente viene rimosso il flussante in eccesso e con l'alcool etilico viene completata la pulizia del retro della cella. Dopo aver verificato con un test elettrico la tensione a vuoto della cella, si taglia il ribbon alle dimensioni desiderate. La cella con i due ribbon saldati è mostrata in Fig 4. 3.



Fig 4. 3 - Cella solare con i due contatti positivi saldati

Terminate le saldature sulle 20 celle, si può procedere alla saldatura dei diodi sul circuito stampato, operazione che deve essere necessariamente svolta prima dell'incollaggio delle celle sullo stesso.

4.3 Saldatura dei diodi

La saldatura dei diodi è effettuata sul PCB nudo e pulito, utilizzando un saldatore ad aria calda. Durante questa operazione è importante assicurarsi del corretto verso di posizionamento del diodo prima di procedere con la saldatura. Durante la saldatura lo stagno della pasta saldante, tenderà a raccogliersi sulle piazzole, centrando automaticamente il diodo sulle piazzole.

Al termine della saldatura dei 21 diodi (20 diodi di bypass e un diodo di blocco) si procede ad un test elettrico sulla scheda per verificare che tutti i diodi siano stati saldati nel verso giusto. La saldatura dei diodi è riassunta nella Fig 4. 4.



Fig 4. 4 - La saldatura del diodo: (a) la pasta saldante viene deposta sulle piazzole; (b) il diodo viene posizionato sulla pasta saldante; (c) viene effettuata la saldatura tramite un saldatore ad aria calda.

Completata la saldatura dei diodi, si può procedere con il taglio dei vetrini di protezione e con il taglio del nastro biadesivo.

4.4 Taglio dei vetrini di protezione

Il taglio dei vetrini di protezione è una delle fasi critiche dell'intera procedura ed è eseguito in camera pulita. Il taglio è realizzato tramite una penna a punta diamantata, per il cui corretto utilizzo è importante applicare la giusta pressione durante il taglio che deve essere caratterizzato da un tratto deciso e continuo; un tratto non costante e non uniforme potrebbe causare la creazione di microcricche che durante la separazione delle due parti provocherebbero la rottura del vetrino. Il taglio delle aree corrispondenti ai contatti superiori della cella e del diodo integrato non è realizzato con una forma rettangolare, così come quella dei contatti, per via della difficoltà di realizzazione e perché non garantirebbe un taglio continuo ed uniforme; è piuttosto realizzato con una opportuna forma ad arco.

Il taglio dei vetrini del primo prototipo è realizzato in due successivi passi:

- taglio orizzontale per ridurre l'altezza del vetrino da 40mm a 26.4mm;
- taglio delle aree che corrispondono alle posizioni dei contatti negativi della cella e a quella del diodo integrato (tacche).

Questa procedura ha presentato delle problematiche nella realizzazione successiva delle tacche, poiché il taglio orizzontale introduce già delle sollecitazioni e realizzare successivi tagli che partono dal bordo tagliato, comporta il rischio di rotture o di creazione di microcricche durante la separazione delle tacche. Per questo motivo è stata realizzata una dima in teflon, che permette di realizzare il taglio orizzontale e le tacche corrispondenti ai contatti negativi della cella, in un'unica operazione. La tacca del diodo non ha questi problemi, poiché ricavata sul bordo in cui non c'è stato alcun taglio precedente.

E' importante, inoltre, assicurarsi di eseguire i tagli delle tacche ricordando che la superficie con il trattamento antiriflesso dovrà rimanere verso l'esterno.

La realizzazione del taglio è mostrata nella Fig 4. 5.



Fig 4. 5 - Taglio dei vetrini: (a) inizia il taglio, (b) taglio delle tacche, (c) separazione delle due parti.

Il taglio viene ripetuto per circa 20-23 vetrini di protezione, questo per avere sufficienti elementi di scorta nel caso di rottura di un vetrino durante l'incollaggio. Il vetrino al termine del taglio è mostrato in Fig 4. 6.



Fig 4. 6 - Comparazione del vetrino originale (sinistra) con il vetrino tagliato (destra): sono evidenti le tacche corrispondenti al diodo integrato e ai contatti della cella.

Terminato il taglio dei vetrini di protezione, si può procedere all'incollaggio delle celle sul circuito stampato.

4.5 Incollaggio delle celle sul PCB

L'incollaggio delle celle sul circuito stampato avviene in camera pulita. Prima di procedere con l'incollaggio bisogna pulire accuratamente la scheda e tagliare il nastro.

Il taglio del nastro va effettuato assicurandosi di ottenere dal foglio il massimo numero di pezzi e nel nostro caso è stato possibile ricavarne 21 da ogni foglio (di dimensioni 20.32 x 25.4 cm).

E' stata realizzata una dima per favorire la procedura di taglio, questa avrà le dimensioni della cella aumentate di 0.1mm per compensare un non corretto posizionamento del nastro sul circuito o della cella sul nastro. A seguito di diverse prove è emerso, infatti, che qualora la cella non aderisce totalmente sul nastro le parti non incollate possono danneggiarsi e rompersi facilmente, inoltre il nastro è utile come riferimento nel successivo posizionamento della cella. La dima riporta, inoltre, i due intagli che escludono le superfici in cui c'è il ribbon posteriore e le cui dimensioni sono identiche alle sedi ricavate nel circuito stampato.



Il taglio del nastro e il risultato finale sono evidenziati in Fig 4. 7.

Fig 4. 7 - Taglio del nastro: a) posizionamento della dima; b) risultato finale.

Dopo aver tagliato 20 pezzi di nastro si può procedere con l'incollaggio del nastro biadesivo sul circuito stampato.

E' importante assicurarsi che non rimangano intrappolate bolle d'aria sotto il nastro, perché queste potrebbero esplodere in vuoto causando il danneggiamento della cella [16] [33].

L'incollaggio del nastro sul PCB inizia rimuovendo la copertura di protezione sul lato del nastro che andrà a contatto con la scheda.

Dopo averlo posizionato attentamente nel punto richiesto, con l'ausilio di una spatola in teflon, questo viene fatto aderire gradualmente sulla scheda facendo scorrere la spatola in modo da evitare la formazione di bolle.

Se, da controllo visivo, si ritiene che il nastro non sia stato installato correttamente, questo può essere rimosso e riapplicato.

La procedura è riassunta in Fig 4. 8.



Fig 4. 8 - Incollaggio del nastro sulla scheda: (a) il nastro viene posizionato; (b) il nastro viene incollato con l'ausilio della spatola in teflon.

Al termine dell'operazione, ripetuta per tutte le 20 celle, la scheda si presenta come in Fig 4. 9.



Fig 4. 9 - La scheda con il nastro biadesivo applicato su ogni piazzola in cui saranno incollate le celle.

Si può quindi procedere con l'incollaggio delle celle sul PCB, dopo aver nuovamente pulito le celle. Con il bisturi viene rimossa la pellicola protettiva sulla faccia superiore del nastro, il bordo della cella viene posizionato sul rispettivo bordo del nastro esposto, viene accompagnata sul nastro e una volta posizionata si corregge con il bisturi il suo posizionamento. Con l'ausilio di una spatola in teflon si applica una leggera pressione sulla cella, facendola aderire sul nastro. La procedura è mostrata in Fig 4. 10.



Fig 4. 10 - Incollaggio della cella sulla scheda: (a) rimozione della pellicola del nastro; (b) posizionamento della cella sul nastro biadesivo; (c) con l'ausilio di spatole di teflon viene fatta aderire al nastro.

La procedura si ripete per tutte le 20 celle, a questo punto possono essere realizzate e completate le saldature della cella sulla scheda.

4.6 Saldatura dei contatti della cella

La cella, a questo punto, può essere collegata anche elettricamente al circuito stampato. Le saldature da completare per ogni cella sono:

- diodo integrato e corrispettiva piazzola sul PCB;
- i contatti negativi della cella con le rispettive piazzole sul PCB;
- i due ribbon saldati sul retro della cella con le rispettive piazzole sul PCB.

In particolare la saldatura dei contatti negativi si è rivelata essere l'elemento più critico nella costruzione del pannello per i seguenti motivi:

- i contatti negativi sulla cella si sono rivelati essere molto fragili e sensibili e la loro rottura provoca una perdita di prestazioni della cella, in alcuni casi anche totale;
- nell'operazione di saldatura è facile che residui di stagno possano depositarsi sul bordo della cella e generarne il cortocircuito.

Pertanto, per ridurre al minimo le interazioni meccaniche tra gli strumenti di saldatura e i contatti della cella e per evitare cortocircuiti ed assicurare la corretta pulizia della cella, si è deciso di utilizzare un saldatore ad aria calda e di preformare il ribbon dandoli una leggera forma ad arco.

La procedura analoga a quelle delle precedenti saldature e mostrata nella Fig 4. 11, è composta dalla stesura tramite una siringa della pasta saldante su tutti i contatti della cella e le piazzole del PCB, quindi si posiziona il ribbon e si salda.

Al termine della saldatura, dopo la pulizia della cella e della singola scheda da residui di stagno e flussante, si procede con un test elettrico sulla singola cella.



Fig 4. 11 - La saldatura dei contatti superiori della cella: (a) deposizione della pasta saldante; (b) posizionamento del ribbon; (c) saldatura, si nota il flussante fluire lontano dalla saldatura.

Dopo aver completato le saldature dei contatti di tutte le celle, si possono quindi misurare le caratteristiche elettriche del pannello fotovoltaico e procedere ad una accurata pulizia delle celle e della scheda.

Si può pertanto procedere all'applicazione del coverglass sulle celle.

4.7 Incollaggio dei vetrini

L'incollaggio dei vetrini di protezione è condotto in camera pulita. Prima di procedere con l'incollaggio sono necessarie alcune operazioni preliminari, come la preparazione della colla e l'applicazione del primer sulle superfici da incollare.

Il CV15-2500P è un prodotto bi-componente, i cui componenti devono essere miscelati in rapporto 1:1 [24] e il composto deve essere fatto deareare in una campana a vuoto. Per la nostra applicazione è stato deciso di produrre 12g di colla, miscelando in un beaker 6g di entrambi i componenti.

Durante la fase di preparazione della colla si può stendere con un soffice pennello il primer CF1-135, sulla superficie delle celle e sulla superficie dei vetrini di protezione che sarà incollata alle celle.

Il primer, che è attivato dall'umidità atmosferica, deve essere lasciato asciugare per 30 minuti a temperatura ambiente e 50% di umidità (condizioni presenti in camera pulita) per potersi attivare [25].

Dopo quest'asciugatura si forma una leggera patina bianca sulle superfici che tende a scomparire con l'applicazione della colla. Se la patina persiste, vuol dire che lo strato di primer applicato è troppo spesso; va quindi rimosso e riapplicato [25].

Nella Fig 4. 12 è mostrata l'applicazione del primer.



Fig 4. 12 - Applicazione del primer: (a) il viene steso sulle celle con l'ausilio di un pennello; (b) il primer sta essiccando, si nota una soffice patina bianca.

Una volta essiccato il primer, si può iniziare l'incollaggio vero e proprio dei vetrini.

La tecnica usata per incollare i vetrini è quella del sacco a vuoto, opportunamente adattata e semplificata.

La tecnologia del vuoto [34], tipica dello stampaggio di manufatti in composito, sfrutta la pressione atmosferica per eliminare le inclusioni di aria e migliorare la distribuzione della resina tra gli elementi da incollare, riducendo i difetti dovuti all'incostanza dell'intervento manuale, garantendo un' incollaggio uniforme.

Una quantità sufficiente di colla viene distribuita nel centro della cella, quindi un vetrino di protezione viene posizionato sulla cella e manualmente si schiaccia facendo uscire la colla in eccesso e con essa le possibili bolle d'aria formatesi durante l'applicazione del vetrino.

E' importante assicurarsi che non rimangano bolle dopo che sarà stato applicato il vetrino e se vengono individuate vanno accompagnate con delle piccole pressioni verso i bordi della cella e fatte uscire.

A questo punto può essere approntato il sacco a vuoto con tutti i suoi tessuti assorbenti. Nella realizzazione del primo prototipo, è stata eseguita una mascheratura parziale della scheda e della superficie superiore dei vetrini, tuttavia dopo l'apertura del sacco a vuoto la colla residua sulle aree non mascherate è stata facilmente rimossa, per questo nella realizzazione del secondo prototipo non è stata eseguita alcuna mascheratura.

Il materiale, da noi scelto, per la realizzazione del sacco a vuoto mostrato in Fig 4. 13, è stato fornito come campione gratuito dall' AIRTECH Europe Sarl. Le caratteristiche principali e le funzioni dei prodotti utilizzati per il vuoto sono [35]:

- Econostitch G: è un tessuto distaccante in poliestere, la cui funzione è quella di evitare che gli strati successivi del sacco a vuoto s'incollino sulle superfici sottostanti. La temperatura massimo di utilizzo è 190°C [35];
- Airweave A: è un tessuto sintetico intrecciato utilizzato per assorbire l'eccesso di resina. La temperatura massima di utilizzo è 204°C [35];
- Airweave N10: è un tessuto di ventilazione in grado di assorbire la resina in eccesso ed ha anche la funzione di protegge il film per

sacchi a vuoto dall'eventuale presenza di angoli acuti. E' in poliestere e la temperatura massima di utilizzo è 204°C [35];

- Securlon® L-1000: è un film multi strato in nylon per sacco a vuoto. La temperatura massima di utilizzo è 202°C [35];
- Airseal 2: è un sigillante per sacchi a vuoto, dall'elevato livello di appiccicosità. La temperatura massima di utilizzo è 180°C [35].



Fig 4. 13 - Tecnica del sacco a vuoto: (a) la scheda viene posta su uno strato di Securlon e AirweaveN10, con il sigillante incollato sul bordo; (b) viene posizionato uno strato di EconostitchG; (c) viene applicato l'AirweaveA; (d) un secondo strato di AirweaveN10 viene posizionato; (e) il sacco a vuoto viene chiuso e accuratamente sigillato; (f) viene inserito il tubo della pompa in un taglio eseguito sul Securlon, sigillato e viene applicato il vuoto.

Il vuoto viene mantenuto per 24 ore, al termine delle quali il sacco viene aperto e il pannello viene posto in forno per la cura a 75°C per 45 minuti, come mostrato in Fig 4. 14.



Fig 4. 14 - Completamento dell'incollaggio: (a) apertura del sacco a vuoto; (b) cura in forno del pannello.

Il risultato finale dell'incollaggio su un gruppo di celle è mostrato in Fig 4. 15 , si può notare l'assenza di bolle e la precisione dell'incollaggio.



Fig 4. 15 - Un gruppo di celle al termine dell'incollaggio, prima della pulizia finale.

4.8 Completamento del pannello

Al termine dell'incollaggio e dopo la pulitura del pannello, si effettua un test elettrico e visivo per verificare il corretto funzionamento del pannello. Si può procedere quindi con il collegamento della termocoppia e dei fili.

La giunzione della termocoppia viene inserita in un capocorda che viene saldato sulla corrispettiva piazzola, mentre i due fili AWG22 il cui materiale di rivestimento è teflon (PFTE), vengono direttamente saldati sulle rispettive piazzole

La Fig 4. 16 mostra il pannello completo.



Fig 4. 16 - Il pannello fotovoltaico completo.

5

QUALIFICA DEL PANNELLO FOTOVOLTAICO

Nel presente capitolo sono descritti i test di qualifica del pannello fotovoltaico. Una breve introduzione su queste prove e sul test di caratterizzazione condotto sulla singola cella solare è seguita dalla descrizione della qualifica sperimentale. I requisiti, il setup sperimentale ed i risultati della caratterizzazione elettrica dell'intero panello fotovoltaico sono presentati assieme al test di degassamento secondo la normativa standard ECSS-Q-ST-70-02 [36][41].

5.1 Introduzione

Conclusa la progettazione e la costruzione del pannello fotovoltaico, questo va qualificato ed, in particolare, va determinata la curva caratteristica I-V (corrente - tensione) e calcolato l'indice di degassamento in vuoto, che ne stabilisce l'idoneità al volo.

Alcuni test preliminari sono stati condotti per caratterizzare il modello di celle solari a disposizione. Tali test si sono focalizzati sull'andamento qualitativo della curva caratteristica I-V e sulla verifica della presenza e del funzionamento del diodo integrato. Tali caratterizzazioni sono state poi utilizzate per identificare le specifiche soluzioni progettuali, come ad esempio la non interferenza fra il diodo integrato ed il diodo di bypass esterno.

La curva caratteristica I-V della cella è stata determinata tramite un semplice apparato sperimentale, costituito da una serie di resistenze e da un multimetro con il quale si misura la tensione ai capi della cella sotto differenti condizioni di carico. La cella fotovoltaica con una serie di resistenze applicate è mostrata in Fig 5. 1. La curva caratteristica I-V ottenuta è mostrata in Fig 5. 2.



Fig 5. 1 - Caratterizzazione della cella: il test è stato svolto all'aperto, l'apparato è composto da un multimetro, dalla cella montata su una millefori utilizzata per collegare le resistenze da applicare come carico alla cella, da una serie di resistenze.



Fig 5. 2 - Curva caratteristica della cella solare.

La conoscenza della curva caratteristica della cella permette di verificare il corretto comportamento del pannello, essendo le celle collegate in serie la tensione del pannello sarà data dalla somma delle 20 celle meno la caduta di potenziale causata dal diodo di blocco.

5.2 Curva caratteristica del pannello fotovoltaico

La curva caratteristica corrente - tensione dell'intero pannello fotovoltaico è stata determinata attraverso prove condotte all'esterno in una giornata soleggiata.

Per disegnare la curva è stato adottato un sistema differente rispetto a quello utilizzato per la cella, poiché occorrono resistenze fisse o variabili in grado di dissipare le potenze in gioco, che possono arrivare anche a 10W. Poiché non erano a disposizione resistenze con queste caratteristiche è stato realizzato un circuito che si basa sull'utilizzo dell'integrato LM137 [37] come regolatore di corrente.

Con riferimento alla Fig 5. 3, il regolatore tende a mantenere una tensione di 1,25V tra i terminali *output* ed *adjust* ed il calcolo della corrente in uscita è determinato dalla legge di Ohm

$$I = \frac{V_{REF}}{R} = \frac{1.25 \, V}{R}$$
(5.1)

dove R è la resistenza connessa tra i due terminali.



Fig 5. 3 - Disegno dell'integrato LM137 e relativa piedinatura.

Variando pertanto tale resistenza è possibile cambiare il valore della corrente in uscita.

Collegando il pannello fotovoltaico all'integrato LM137 ed utilizzando una resistenza variabile, si può variare la corrente estratta dal pannello e misurare la tensione ai suoi capi.

Variando la resistenza si cambia, pertanto, la corrente ed è possibile disegnare la curva caratteristica del pannello fotovoltaico.

La peculiarità di questo metodo risiede nel fatto che la resistenza applicata sarà attraversata dalla corrente prodotta dal pannello ma ai suoi capi la tensione sarà sempre di 1.25V, anziché essere quella del pannello che supererà i 50V, quindi la potenza che la resistenza dovrà dissipare sarà 40 volte inferiore.



Fig 5. 4 - Lo schema del circuito per caratterizzare il pannello: il "+" ed il "-" sono i terminali del pannello; è visibile il parallelo di resistenze e il posizionamento degli strumenti di misura.

Il potenziometro scelto per far variare le corrente è il modello Spectrol 534-200R prodotto dalla VISHAY [38], la cui potenza massima è 2W.

Per essere tuttavia cautelativi sulla potenza che può dissipare il potenziometro e per far variare la corrente tra un valore minimo molto piccolo (5.87mA) e massimo pari a 307mA, è stata messa in serie al potenziometro una resistenza da 120hm ed in parallelo altre due resistenze da 120hm ciascuna collegata al circuito tramite un interruttore, che sarà acceso o spento a seconda degli intervalli di corrente in cui si vorrà far operare il pannello. Questi valori sono riassunti nella Tabella 5. 1.

Intervalli di corrente in cui si può far operare il pannello fotovoltaico					
Interruttore 1	Interruttore 2	I _{min} (mA)	I _{max} (mA)		
ON	ON	214.21	307.53		
OFF	ON	110.04	203.77		
OFF	OFF	5.87	99.20		

Tabella 5. 1 - Intervalli di corrente in cui far operare il pannello in funzione delle resistenze che vengono attivate nel circuito.

Il setup sperimentale è completato da un piranometro; i test di caratterizzazione diventano più significativi se è possibile abbinare l'informazione sull'intensità della radiazione che colpisce il pannello fotovoltaico.

Il piranometro LP PYRA 03 [39], mostrato in Fig 5. 5, misura l'irradiamento su una superficie piana (Watt/m²), che è dato dalla somma dell'irradiamento diretto prodotto dal Sole e dell'irradiamento diffuso.

Il piranometro si basa su un sensore a termopila e sull'effetto Seebeck [39], per il quale la differenza di temperatura tra il centro della termopila (giunto caldo) e il corpo del piranometro (giunto freddo), è convertita in una

differenza di potenziale misurata da un multimetro collegato al piranometro. Tramite il fattore di calibrazione del piranometro è possibile determinare l'irradiamento secondo la formula

$$E_e = \frac{DDP}{S} \tag{5.2} [39]$$

dove E_e è l'irradiamento espresso in W/m^2 , DDP è la differenza di potenziale espressa in μV misurata dal multimetro ed S è il fattore di calibrazione, misurato in $\mu V/(~W/m^2)$, con S=9.51 $\mu V/(~W/m^2)$ nel nostro caso.

Esistono, inoltre, alcune precauzioni nell'utilizzo del piranometro, in particolare deve essere posto sullo stesso piano della superficie sulla quale si vuole determinare la radiazione incidente e il cavo elettrico che esce dallo strumento deve essere rivolto dalla parte del polo nord [39].



Fig 5. 5 - Il piranometro, è possibile leggere il fatto di calibra mento dello strumento (Sensitivity) e sono visibili gli spinotti che si collegheranno al voltmetro.



Il setup sperimentale si presenta, alla fine, come in figura Fig 5. 6.

Fig 5. 6 - Il setup sperimentale: (a) è visibile il pannello e il piranometro entrambi disposti sulla stessa superficie, con il filo del piranometro rivolto verso il nord; (b) a sinistra si può notare l'integrato LM317 montato su una piastra alettata per dissipare il calore, il potenziometro e i due interruttori che attivano il ramo del circuito in cui c'è ciascuna resistenza in parallelo; a destra ci sono tre multimetri, uno per misurare la tensione ai capi del pannello, l'altro la corrente e l'ultimo il voltaggio del piranometro.

Noto pertanto l'irradiamento, è possibile determinare il rendimento del pannello tramite la relazione

$$\eta = \frac{P}{E_e \times A} \times 100 \tag{5.3} [9]$$

dove P è la potenza elettrica prodotta dal pannello in W, E_e è l'irradiamento definito nella relazione (5.2), A è la superficie totale delle celle, pari a 385.95cm² [14].

E' possibile ora introdurre i risultati dei test di caratterizzazione dei due prototipi costruiti ed in particolare le curve caratteristiche corrente tensione di ciascuno di essi.

Per ogni prototipo sono state eseguite due prove, indicate rispettivamente come Prova 1 e Prova 2, in cui sono state misurate la corrente e la tensione prodotta dal pannello, la tensione del multimetro collegato al piranometro e dalla quale è possibile determinare tramite la relazione 5.2, l'irradiamento sul pannello e di conseguenza tramite la relazione 5.3 la rispettiva efficienza. Ogni singola prova è stata eseguita rapidamente per essere certi di svolgerla in condizioni quanto più possibili invarianti durante la stessa.

5.2.1 Curve caratteristiche del primo prototipo

Nella Tabella 5. 2 e nei grafici di Fig 5. 7 e Fig 5. 8, sono mostrati i risultati dei test condotti sul primo prototipo.

Nei grafici oltre alla curva caratteristica I-V è rappresentata la potenza (W) in funzione del voltaggio (V), si può notare il picco di potenza che corrisponde al punto di massima potenza del pannello.

Da un'analisi dei grafici si nota che per tensioni intorno ai 40V, la curva I-V presenta una strana "s", questo comportamento è dovuto ad almeno una cella che risulta parzialmente danneggiata.

Il primo prototipo è stato il banco di prova su cui valutare le varie soluzioni costruttive, in particolare il metodo di saldatura e questo ha comportato un minimo degrado delle prestazioni di qualche cella.

V1 - Prova 1				V1 - P	Prova 2		
V(V)	l (mA)	P (W)	DDP (mV)	V(V)	l (mA)	P (W)	DDP (mV)
3.174	251	0.796674	9.2	3.228	258.8	0.835406	9.2
20.7	246.1	5.09427	9.2	20	255.1	5.102	9.2
37.95	225.4	8.55393	9.2	37.37	224.8	8.400776	9.2
40.4	205.1	8.28604	9.2	39.8	205.1	8.16298	9.2
42.6	173.1	7.37406	9.2	44.1	150.2	6.62382	9.2
44.7	151.8	6.78546	9.2	46.1	101.8	4.69298	9.2
46.5	125.6	5.8404	9.2	47.1	46.5	2.19015	9.2
47.1	101.8	4.79478	9.2	48	0	0	9.2
47.7	72.2	3.44394	9.2				
48	51.3	2.4624	9.2				
48.4	24.62	1.191608	9.2				
48.9	0	0	9.2				

Tabella 5. 2 - Tensione, corrente, potenza, differenza di potenziale, misurate nei test del primo prototipo.



Fig 5.7 - Curve caratteristiche del primo prototipo relative alla Prova1.



Fig 5.8 - Curve caratteristiche del primo prototipo relative alla Prova2.

Il rendimento calcolato secondo la relazione (5.3) in entrambe le prove è tabulato nella Tabella 5. 3.

Rendimento del primo prototipo			
Test	η		
Prova 1	22.91%		
Prova 2	22.49%		

Tabella 5.3 - Rendimento del primo prototipo.

5.2.2 Curve caratteristiche del secondo prototipo (unità di volo)

Nella Tabella 5. 2 e nei grafici di Fig 5. 9, Fig 5. 10 e Fig 5. 11, sono mostrati i risultati dei test condotti sul secondo prototipo.

Nei grafici oltre alla curva caratteristica I-V è rappresentata la potenza (W) in funzione del voltaggio (V), si può notare il picco di potenza che corrisponde al punto di massima potenza del pannello.

A differenza dei risultati ottenuti per il primo prototipo, caratterizzati da una curva corrente - tensione che presentava una "s" all'altezza del ginocchio, si può notare l'andamento regolare previsto della curva I-V del pannello, sinonimo della corretta ed efficiente procedura di costruzione.

Il valore della tensione a circuito aperto, V_{oc} , pari a 50.7V è compatibile con il valore che si ottiene dalla somma delle 20 tensioni delle celle che in queste condizioni operative è di poco superiore a 2.5V, meno la caduta di circa 0.6V del diodo di blocco.

V2 - P	rova 1				V2 - Pro	va 2	
V(V)	l (mA)	P (W)	DDP (mV)	V(V)	l (mA)	P (W)	DDP (mV)
3.237	267.5	0.865898	9.7	3.1	247	0.7657	9.1
19	263.2	5.0008	9.7	10	245.5	2.455	9.1
39.25	250.2	9.82035	9.7	20	243.2	4.864	9.1
46	205.4	9.4484	9.7	40.9	223.7	9.14933	9.1
48.3	149	7.1967	9.7	43.8	205.3	8.99214	9.1
49.2	101.9	5.01348	9.7	46.2	174.6	8.06652	9.1
49.9	49.2	2.45508	9.7	47.1	152.6	7.18746	9.1
50.7	0	0	9.7	47.9	124.9	5.98271	9.1
				48.4	101.9	4.93196	9.1
				49.2	49.8	2.45016	9.1
				50.1	0	0	9.1

Tabella 5. 4 - Tensione, corrente, potenza, differenza di potenziale, misurate nei test del secondo prototipo.



Fig 5. 9 - Curve caratteristiche del secondo prototipo relative alla Prova1.



Fig 5. 10 - Curve caratteristiche del secondo prototipo relative alla Prova2.


Fig 5. 11 - Le curve caratteristiche delle due prove messe a confronto.

Mettendo a confronto le curve delle due prove, così come mostrato in Fig 5. 11, si può apprezzare l'effetto della differente intensità della radiazione che colpisce il pannello, discusso nel Paragrafo 2.2. In particolare, come previsto, si nota una diminuzione della corrente proporzionale all'intensità, mentre la tensione varia di poco (0.6V).

Il rendimento calcolato secondo la relazione (5.3) in entrambe le prove è tabulato nella Tabella 5. 5.

Rendimento del secondo prototipo		
Test	η	
Prova 1	24.95%	
Prova 2	24.77%	

Tabella 5. 5 - Rendimento del secondo prototipo.

I valori del rendimento sono molto vicini al rendimento nominale del 30% previsto per la singola cella determinato con uno spettro solare di tipo AM0, intensità della radiazione pari 1367 W/m^2 e alla temperatura di 28°C [14].

Pannelli fotovoltaici a basso costo per piccoli satelliti: progettazione, sviluppo e qualifica per applicazione su UniSat5

5.3 Test di termo-vuoto per determinare l'outgassing del pannello

Il test di qualifica richiesto per certificare l'idoneità del pannello fotovoltaico all'ambiente spaziale, è quello che richiede la determinazione del grado di degassamento dello stesso.

L'esposizione dei materiali a condizioni di alto vuoto può indurre diffusione, sublimazione ed evaporazione delle sostanze più volatili. Tale fenomeno, outgassing o degassamento, risulta accelerato ed incrementato quando il vuoto è associato ad altri fattori degradanti come l'ossigeno atomico (AO), elevate temperature e radiazioni ad alta energia [9]. La perdita di materia per outgassing, in genere, non è un problema per le caratteristiche del materiale coinvolto, ma il materiale volatile spesso può depositarsi, condensare o polimerizzare per effetto di temperatura e/o radiazioni su superfici otticamente significative 0 componenti elettrici/elettronici, variandone le caratteristiche funzionali [40].

I materiali polimerici risultano in genere i più critici. Nel caso delle celle solari assemblate con l'impiego di adesivi siliconici ad alta trasparenza e resistenza termica, l'outgassing dell'adesivo crea una "nube" di specie siliconiche volatili in prossimità dei pannelli solari. Queste specie si possono depositare durante le fasi fredde sulle superfici subendo polimerizzazione UV durante le successive esposizioni solari. Questo oltre ai fenomeni degradativi, influisce sulle proprietà ottiche. Inoltre, sempre nel caso di incollaggi, la migrazione delle sostanze volatili, che possono essere presenti sia nell'adesivo che negli aderenti, verso l'interfaccia adesivo/substrato provoca generalmente una degradazione dell'efficienza di incollaggio con possibilità di cedimento della giunzione [9].

I test su materiale per impiego spaziale per determinare l'indice di degassamento devono seguire le specifiche ESA codificate all'interno della normativa standard ECSS-Q-ST-70-02C [41]. In particolare per valutare il Total Mass Loss (TML) la procedura indicata è la seguente [41]:

- preparare il materiale e tenerlo in un' ambiente alla temperatura di (22±3)°C e (55±10)% RH (umidità relativa) per 24 ore;
- misurare il peso iniziale del componente (W_o);
- inserire il componente nella camera a vuoto e portare il sistema a 125°C e 10⁻³Pa entro un'ora;

- mantenere il sistema a 125°C e 10⁻³Pa per 24 ore;
- portare a 50°C il sistema e ventilare;
- misurare il peso finale del componente (W_f);
- determinale il TML% tramite la seguente relazione

$$TML\% = \frac{W_o - W_f}{W_o} \times 100$$
(5.4) [41]

Il test è stato condotto in una camera a vuoto di 1500mm di lunghezza e 600mm di diametro disponibile presso i laboratori di Alta. Questa camera può raggiungere 10⁻⁸ mbar, ma è stata fatta operare a 10⁻⁵mbar in accordo con la normativa ECSS-Q-ST-70-02.

La procedura di test richiede la pesatura del componente prima e dopo il test di termo vuoto. La pesatura è stata eseguita con la bilancia di precisione Mettler Toledo WM503-L22 [42], la cui risoluzione è 1mg.

Per portare il pannello a 125°C entro un'ora è stato realizzato un sistema di quattro lampade alogene da 100W, che oltre a permettere il riscaldamento del componente, lo illuminano permettendo di verificare il funzionamento del pannello fotovoltaico in condizioni di vuoto (test di termovuoto funzionale). La temperatura del pannello è monitorata attraverso due termocoppie di tipo K, disposte come mostrato in Fig 5. 12.



Fig 5. 12 - Disposizione delle termocoppie sul pannello, è inoltre visibile il sistema di supporto per le 4 lampadine.

Per sostenere le lampadine è stata realizzata una struttura composta da due bracci orizzontali e una copertura in alluminio è stata implementata per incrementare l'efficienza del sistema di riscaldamento, poiché la luce si fa convergere sul pannello evitando la dispersione della stessa verso le pareti della camera. Le quattro lampade sono alimentate da quattro alimentatori esterni (TTI EX355 Power supply 35V/5A) con un feedback di controllo sulle temperature delle due termocoppie. La potenza di ciascuna lampadina è impostata manualmente.

Gli alimentatori esterni sono automaticamente accesi e spenti in modo tale da mantenere la temperatura del pannello dentro il range di temperature (124.9°C - 125°C) previsto dalla normativa. La Fig 5. 13 mostra la preparazione del sistema di setup, mentre la Fig 5. 14 mostra la camera a vuoto e il sistema di alimentatori esterni utilizzato per accendere le lampadine.



Fig 5. 13 - La preparazione del setup sperimentale: è visibile la copertura in alluminio e il sistema di sostegno delle lampadine.

Pannelli fotovoltaici a basso costo per piccoli satelliti: progettazione, sviluppo e qualifica per applicazione su UniSat5



Fig 5. 14 - La camera a vuoto (dietro), il sistema di alimentatori (al centro a destra) e il multimetro per misurare la tensione a vuoto del pannello fotovoltaico (sotto a destra).

Il test ha inizio con il condizionamento del pannello in camera pulita (classe 100.000) per 24 ore in un' ambiente controllato: 23°C e 55% di umidità relativa.

Successivamente il pannello, trasportato in un sacco in polietilene cosi come previsto dalla normativa, è stato pesato in una camera chiusa (a pressione atmosferica) per evitare perturbazioni della misura dovute a flussi di aria. La pesatura, prima e dopo il test, include i fili di connessione e la termocoppia di tipo J installata sul pannello, così come mostrato in Fig 5. 15.



Fig 5. 15 - Pesatura del prototipo con la termocoppia di tipo J (di cui è visibile il cavo intrecciato bianco e nero) e i fili di connessione (cavo intrecciato giallo-nero) installati.

E' stato approntato quindi il setup dell'esperimento, le due termocoppie di tipo K sono state installate per consentire la misura della temperatura, mentre per misurare la tensione sono stati utilizzati i fili di connessione del pannello stesso.

La camera a vuoto è stata chiusa ed è iniziata la procedura di vuoto. Quando la pressione in camera ha raggiunto il valore di $3x10^{-4}$ mbar, è stato acceso il sistema di riscaldamento ed illuminazione. Entro un'ora dall'inizio della procedura di vuoto il sistema è stato portato a 125° C e 10^{-3} Pa ed è stato mantenuto a questi valori per 24 ore, così come specificato nella normativa ECSS-Q-ST-70-02 [41].

La mostra Fig 5. 16 il pannello nella camera a vuoto durante il test, quando le lampadine sono accese.



Fig 5. 16 - Il pannello in camera a vuoto nella fase di riscaldamento/illuminazione durante il test di termo vuoto.

Al termine delle 24 ore, la lampadine sono state spente ed il sistema raffreddato fino a 50°C e quindi ventilato. Una volta riaperta la camera, le termocoppie di tipo K sono state rimosse ed il pannello è stato ripesato nelle stesse condizioni iniziali.

Delle due termocoppie di tipo K montate sul pannello, una è stata direttamente posizionata sotto una delle lampadine ed è stata utilizzata per monitorare la temperatura di riferimento (125°C) e controllare pertanto l'accensione e lo spegnimento del sistema di riscaldamento. L'altra termocoppia è stata posizionata sul bordo del pannello per verificare il gradiente di temperatura sulla scheda. La termocoppia periferica ha misurato 110°C in condizioni stazionarie. Il profilo di temperatura delle due termocoppie è mostrato in Fig 5. 17.

Sono chiaramente visibili la fase di riscaldamento iniziale e la temperatura costante mantenuta per la durata dell'esperimento.



Fig 5. 17 - Il profilo di temperatura durante la fase di test: in rosso la temperatura della termocoppia interna che è stata monitorata per controllare l'accensione e lo spegnimento del sistema di alimentazione; in giallo la temperatura della termocoppia esterna.

Il profilo di pressione è invece mostrato in Fig 5. 18.

Si nota l'andamento decrescente della pressione e l'assenza di picchi di pressione durante la fase di test, tranne quando sono state accese le lampadine. Questo andamento è sinonimo del basso indice di degassamento del pannello.



Fig 5. 18 - Il profilo della pressione durante la procedura di vuoto.

I risultati del test di outgassing su entrambi i prototipi, calcolati secondo la formula (5.4) e tabulati nella Tabella 5. 6, sono conformi ai requisiti minimi previsti dalla normativa, TML% minore del 1% [41][43].

Total Mass Loss del pannello fotovoltaico				
Prototipo	$W_o(g)$	$W_{f}(g)$	TML%	
Primo prototipo	450.980	450.930	0.013	
Secondo prototipo	478.120	477.835	0.06	
Taballa 5.6. TMI % dai dua prototini				

Tabella 5. 6 - TML% dei due prototipi

Il differente indice di degassamento dei due prototipi deriva dal fatto che durante il test sul primo prototipo la temperatura durante l'esperimento è stata mantenuta a 80°C e nelle parti periferiche era pari a 50°C.

La chimica del processo di outgassing è, infatti, fortemente influenzata dalle condizioni di temperatura [41].

L'andamento della tensione a circuito aperto del secondo prototipo è mostrato in Fig 5. 19.



Fig 5. 19 - Andamento della tensione a vuoto durante l'esperimento. I valori sono filtrati dalle fasi di non illuminazione. La diminuzione della tensione iniziale deriva dalla diminuzione della potenza fornita alle lampadine e dalla dipendenza della tensione a circuito aperto dal gradiente di temperatura (-6mV/°C [14]).

Il pannello durante la prova di termovuoto ha funzionato correttamente ed ispezioni visive hanno verificato la resistenza dell'incollaggio nelle condizioni di termovuoto.

6

CONCLUSIONI E PROSPETTIVE DI SVILUPPO

6.1 Conclusioni

Questo lavoro di tesi si è concentrato sullo sviluppo, il progetto e la costruzione di un pannello fotovoltaico da applicare su UniSat-5, un microsatellite che sarà lanciato in orbita nella prima metà del 2013.

L'applicazione del pannello su UniSat-5 è stato un valido banco di prova per gli obiettivi più generali preposti, quali lo sviluppo di un pannello fotovoltaico a basso costo, bassa tecnologia e con criteri di sviluppo flessibili in termini di adattabilità a differenti superfici. Vista la combinazione dei requisiti meccanici ed elettrici richiesti dall'integratore di sistema e le caratteristiche della superficie destinata ad accogliere il pannello che oltre ad essere di dimensioni limitate, presenta diversi elementi sporgenti (l'interfaccia di collegamento e le superfici di centraggio tra pannello e lanciatore), il progetto del sistema ha richiesto un alto grado di flessibilità. Pannelli fotovoltaici a basso costo per piccoli satelliti: progettazione, sviluppo e qualifica per applicazione su UniSat5

La soluzione adottata, ossia l'uso di un circuito stampato per collegare tra loro le celle e come supporto meccanico del pannello, si è rivelata ottimale per rispondere a questa esigenza ed è una soluzione a basso costo.

Il connubio tra incollaggio delle celle sul circuito stampato tramite il nastro biadesivo e l'incollaggio dei vetrini di protezione sulle celle tramite un silicone a volatilità controllata applicato con la tecnica del sacco a vuoto, ha risposto adeguatamente ai vincoli di bassa tecnologia e basso costo. In particolare il coverglass delle celle realizzato in casa, ha comportato un notevole risparmio sui costi di produzione a fronte di un impegno tecnologico limitato.

Un ulteriore obiettivo iniziale, requisito proveniente dall'applicazione su UniSat-5 ma valido per ogni satellite, è stato quello di ottenere un pannello con un basso indice di degassamento. Gli adesivi rappresentano gli elementi più critici da questo punto di vista; tuttavia la scelta di prodotti siliconici a volatilità controllata ha portato alla produzione di un pannello con un basso indice di degassamento (0.06%). I requisiti elettrici grazie al giusto impacchettamento delle celle, sono stati rispettati, così come quelli meccanici. Il costo di produzion pannello è di circa 4000€, ma l'85% del costo è dato dalle celle solari nude.

Nella Fig 6. 1 è mostrato un prototipo del circuito stampato sul quale è incollata la singola cella nuda montato su un prototipo del satellite pronto per i test di vibrazione.



Fig 6. 1 - Il prototipo del circuito stampato è montato su un modello del microsatellite UniSat-5.

6.2 Sviluppi futuri

Allo stato attuale il lavoro si è fermato alla produzione di un pannello fotovoltaico per una specifica applicazione.

Obiettivi futuri sono lo sviluppo di pannelli fotovoltaici che dispongano di un'elettronica integrata che permetta di valutare il comportamento di differenti sistemi di copertura, ossia adesivi e vetrini di protezione, differenti applicati su celle sperimentali che non contribuiscono alla produzione della potenza. In particolare, sarebbe opportuno una campagna sperimentale, anche a terra, sul comportamento di questi sistemi sotto una radiazione ultravioletta, per individuare ad esempio adesivi meno costosi ma che garantiscano la resistenza alla radiazione per la durata prevista delle missione.

Un altro elemento oggetto di studio futuro è rappresentato dalla saldatura dei contatti negativi delle celle solari, poichè si è rivelata la fase più critica dell'intera procedura. Inoltre test di rottura e cicli termini sulle saldature possono essere un successivo passo per una più completa qualifica del pannello fotovoltaico.

BIBLIOGRAFIA

[1] Wayne A. Shiroma et al., CubeSats: A Bright Future for Nanosatellites, Central European Journal of Engineering, 2011 [2] Mario Polaschegg, Study of a Cube-Sat Mission, University of Graz, 2005 [3] The CubeSat Program, Cal Poly SLO, Cubesat Design Specification Rev.12 [4] Interorbital, TubeSat Personal Satellite Kit, http://www.interorbital.com/TubeSat 1.htm [5] SSTL, Satellite Classification, http://centaur.sstl.co.uk/SSHP/sshp_classify.html [6] M. N. Alley and J. W. Ward, The potential for 'store-and-forward' communications using small satellites in low earth orbits, 3rd European Conference on Satellite Comunication, 1993 [7] GAUSS SRL, http://www.gaussteam.com/ [8] Kosmotras, DNEPR User's Guide, http://www.kosmotras.ru, 2001 [9] Mukund R.Patarl, Spacecraft Power Systems, CRC Press, 2005 [10] Kirk Woellert et al., Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations, Advances in Space Research, Volume 47, p. 663-684, 2010 [11] Marco De Din, Progetto Preliminare di un Sistema di Gestione Energetica per il Satellite AtmoCube, 2005 [12] G.Gabetta, Celle Solari all'Arseniuro di Gallio: un Futuro sulla Terra, **CESI**, 2012 [13] Carlo Flores, Celle solari per applicazioni spaziali e loro impiego nel settore terrestre, CESI

[14] Data sheet, Azur Space 3G30C, www.azurspace.de

[15] J. Bouwmeester, J. Guo, *Survey of worldwide pico- and nanosatellite missions, distributions and subsystem technology*, Acta Astronautica 67, 2010

[16] Petras Karuza, David Hinkley, Solar Cell Installation Using Double Sided Polysiloxane Pressure Sensitive Adhesiva (PSA) Polymide Film, Aerospace Corporation, 2009

[17] G. Gabetta, *Celle solari al GaAs: dallo spazio alla terra*, CESI, 2009[18] Ion Physics Corporation Burlington, *Solar cell cover glass development*, NASA, 1967

[19] Hayashi Tomonao et al., *Borosilicate cover glass for solar cell of EXOS-D*, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 19th, New Orleans, 1987

[20] Qioptiq, Components for space-based applications: Cover glass, optical solar reflector and ultra thin glass,

http://www.qioptiq.com/space.html

[21] Qioptiq, Solar Cell Coverglass,

http://www.qioptiq.com/download/Qioptiq_Solar-Cell-

Coverglass_Dec10.pdf, 2010

[22] NuSil Technology, ASTM E595 Test Method,

http://www.nusil.com/library/engineering/ASTM%20E-595.pdf

[23] Data sheet, CV4-1161-5P, NuSil Technology, http://www.nusil.com/

[24] Data sheet, CV15-2500P, NuSil Technology, http://www.nusil.com/

[25] Data sheet, CF1-135, NuSil Technology, http://www.nusil.com/

[26] RBmetalli, http://www.rbmetalli.com/

[27] Data sheet, Solder coated ribbon, http://www.schlenk.de

[28] G.Gabetta, C.Flores, *Caratterizzazione dell'array diprova con lente di Fresnel*, CESI, 2004

[29] Data sheet, Vhisay ESH2PD, Vhisay, http://www.vishay.com

[30] Data sheet, J K N T Welded Tip Type, http://it.rs-online.com

[31] Barrie D.Dunn, *Metallurgical Assessment of Spacecraft Parts, Materials and Processes*, Wiley, 1997

[32] Posenato Marco, Progettazione di master per circuiti stampati, 2010

[33] L. Dorn, *Nps-scat; Electrical power system*, Naval Postgraduate School, Monterey, 2009

[34] Domenico Miani, *Tecniche e tecnologie produttive per compositi*, http://web.tiscali.it/SPSCATIGNANO/compositi/rmc/stampoaperto.pdf [35] Data sheet, Catalogo Prodotti, Airtech Europe,

http://catalogue.airtech.lu

[36] ESA, Databases outgassing data, http://esmat.esa.int

[37] Data sheet, LM317, http://it.rs-online.com

[38] Data sheet, Vhisay Spectrol 534, Vhisay, http://www.vishay.com

[39] Data sheet, LP PYRA 03, Delta ohm, http://www.deltaohm.com.br

[40] Ricci, Prove di outgassing su materiali per applicazioni spaziali,

 $http://www.aero.polimi.it/~ricci/bacheca_LS2/downloads/04_Outgassing.pd\ f$

[41] ESA-ESTEC Requirements & Standards Division, *Thermal vacuum outgassing test for the screening of space materials*, ECSS-Q-ST-70-02C, 15 November 2008

[42] Data sheet, WM503-L22, Mettler Toledo, http://it.mt.com

[43] ASTM International, Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment, ASTM E595 - 07