



<b>Publication Year</b>	2004
<b>Acceptance in OA @INAF</b>	2023-02-14T10:38:54Z
<b>Title</b>	Prototipo di Piattaforma LDB
<b>Authors</b>	Ramponi, Marco; MACCULI, CLAUDIO
<b>Handle</b>	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12386/33427">http://hdl.handle.net/20.500.12386/33427</a>

# Prototipo di Piattaforma LDB



Preparato	Ing. Marco Ramponi Dott. Claudio Macculi		Data: 17 nov 2004
Approvato	Dott. Stefano Cortiglioni		17 nov 2004

## Sommario

Il documento descrive un sistema progettato e realizzato per rispondere alle necessità di equipaggiamenti a bordo di palloni di lunga durata (Long Duration Balloon: LDB) che si effettuano necessariamente da regioni Artiche ed Antartiche. Le caratteristiche del sistema, denominato Prototipo Piattaforma LDB (PPLDB), lo rendono inoltre utilizzabile per ogni genere di voli di pallone stratosferico, per il controllo di payload sub-orbitali, o per il controllo remoto di qualsiasi strumentazione quando siano assenti collegamenti terrestri. Le caratteristiche del sistema lo rendono compatibile o facilmente adattabile alle specifiche proprie sia di un equipaggiamento primario (per il controllo del volo) sia di un payload. Il sistema PPLDB é stato testato in condizioni simulate di voli stratosferici, pertanto qualificato in un ampio intervallo operativo di temperatura e pressione, in tutti i suoi componenti.

## Indice

1. Introduzione .....	3
1.1 Ruolo dei partners .....	5
2. Descrizione Moduli .....	6
2.1 Modulo TM/TC (MSITel) .....	6
2.1.1 Maggiori dettagli tecnici .....	6
2.1.2 La Telemetria .....	8
2.2 Modulo gestione potenza (SPSys).....	9
2.2.1 Parallelizzazione del Sistema .....	9
2.2.2 Input-Output .....	10
2.2.3 Principali caratteristiche tecniche.....	10
3. Test Effettuati .....	11

## Allegati

- A - Test in vuoto del modulo di telemetria: effetti termici.
- B - Test in vuoto per simulazione in ascesa di pallone di celle solari: qualifica termica.
- C - Test in vuoto di un modulo del pannello solare: effetti termici.

## 1. Introduzione

Per realizzare i 2 moduli (MSITel e SPSys) descritti nel seguito del documento si é partiti dalla necessità di soddisfare le esigenze dell'esperimento BaR-SPOrt (Balloon-borne Radiometers for Sky Polarization Observations), che costituisce il carico scientifico per un pallone di lunga durata (LDB).

Essendo il pallone in condizioni remote, i punti critici per un volo stratosferico sono: la sezione di potenza per alimentare il payload scientifico e l'invio in telemetria dei dati a terra.

Quest'ultima ha l'effetto di produrre ridondanza sui dati scientifici acquisiti dagli strumenti di bordo grazie alle memorie a stato solido



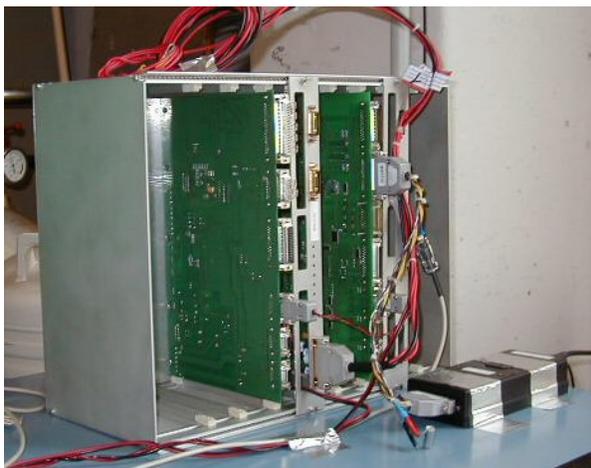
*Fig. 2 Sistema Alimentazione a pannelli solari*

Partendo dalle specifiche di BaR-SPOrt si é tentato di rispondere a queste 2 esigenze primarie per ogni volo LDB:

- Trasmettere a terra i dati sperimentali e di housekeeping (down-link) dell'equipaggiamento di volo e trasmettere comandi dal controllo a terra all'equipaggiamento di volo (up-link)
- Gestire in modo intelligente la potenza generata dalla fonte primaria di potenza qualunque essa sia (batterie, pannelli fotovoltaici, fuel cells)

Il problema é stato affrontato in modo integrato, avendo cioè in mente la risposta ad entrambe le esigenze, ma realizzando due moduli separati in grado di colloquiare tra loro. I requisiti di primo livello adottati per il modulo TM/TC sono:

- Adattabilità ad ogni piattaforma TLC disponibile (telefonia terrestre, GSM, Iridium, Globalstar, Inmarsat, Thuraya, etc...) per garantire il pieno controllo da terra ovunque ed in ogni condizione



*Fig.1 Prototipo di Piattaforma LDB sotto test*

presenti sul payload ed al canale di backup aperto in telemetria. Inoltre la possibilità d'intervenire prontamente in modo remoto su qualsiasi condizione si presenti in volo è sinonimo di sicurezza (intervento repentino in caso di deviazione dalla rotta stabilita del payload) e di grande affidabilità sui dati registrati durante il volo scientifico (memorizzazione sia a bordo che a terra grazie alla connessione via satellite). La Fig.1 mostra le schede di telemetria e gestione pannelli solari durante i test, mentre la Fig.2 mostra l'alimentazione a pannelli solari.

- Utilizzo di 2 canali (modem) per garantire ridondanza
- Utilizzo possibile del secondo canale per ottenere massima bit-rate
- Disponibilità di invio dati di posizione (GPS ) dell'equipaggiamento di volo
- Memorizzazione a bordo su supporto non volatile sia per tutti i dati monitorati che per logfile dei telecomandi inviati
- Capacità di inviare dalla consolle di terra comandi di diverso tipo che agiscono sull'equipaggiamento di volo tramite gli I/O utilizzando finestre grafiche (friendly user interface)
- Disponibilità di I/O di diverso tipo per: sensori vari (temperatura, pressione, tensione, corrente, etc..), comandi di diverso livello (standard, alta sicurezza)
- Possibilità di monitoraggio dei parametri di volo in tempo reale e da più postazioni a terra (via rete)
- Capacità di memorizzare a terra tutti i dati ricevuti in forma grezza
- Capacità di Quick-look grafico dei dati ricevuti
- Utilizzo di ambiente WINDOWS per il s/w di gestione a garanzia di massima portabilità

Mentre quelli per il modulo di gestione potenza sono:

- Adattabilità alle diverse fonti di potenza utilizzabili per un LDB: batterie, fotovoltaico, fuel cells
- Possibilità di fornire fino a 3.6 Kw al carico scientifico, ma operando in modo modulare
- Possibilità di operare sia in modo stand-alone che via telecomandi
- Capacità di colloquio con modulo TM/TC per monitoraggio delle funzioni (invio housekeeping) e per ricezione di telecomandi

Per entrambi i moduli era richiesta la capacità di operare in ambiente stratosferico (non pressurizzato).

La natura dei requisiti di primo livello e la flessibilità delle soluzioni di progetto adottate rendono l'insieme dei 2 moduli descritti nel seguito una vera e propria "Piattaforma LDB" in grado di rispondere alle esigenze di un generico esperimento scientifico. Tutti gli elementi che costituiscono il sistema "Piattaforma LDB" sono stati testati con successo in diversi cicli di volo simulato con attrezzatura Termovuoto messa a disposizione da CNR-IASF Sezione di Bologna.

Un'indagine sui vari sistemi di telefonia satellitare disponibili ha portato alla conclusione che l'unico sistema di libero uso in grado di fornire una copertura totale é IRIDIUM, che é pertanto stato adottato come primario.

## 1.1 Ruolo dei partners

Il prototipo di Piattaforma LDB descritta é stato realizzato da:

- CNR-IASF Sezione di Bologna (Gruppo di Spettrometria e Polarimetria Radio/Microonde)
  - Individuazione degli obiettivi ed emissione di specifiche
  - Assessment delle piattaforme TLC disponibili
  - Fornitura di modem (e accessori) IRIDIUM utilizzati
  - Test di laboratorio sia in ambiente che in Termovuoto
  - Supporto s/w
  - Supporto meccanico
  - Collaudo finale in condizioni operative simulate
- LEN srl (Genova)
  - Progetto e realizzazione h/w dei moduli
  - Progetto e realizzazione del s/w di gestione (onboard/ground)
  - Test
- TELESPAZIO (Roma)
  - Supporto tecnico per utilizzo piattaforma TLC Iridium
  - Fornitura del traffico IRIDIUM per tutta la durata dell'attività

## 2. Descrizione Moduli

### 2.1 Modulo TM/TC (MSITel)

MSITel (Multi Source Iridium Telemetry, Fig. 3) é una Unità di Controllo Telemetria concepita per interfacciarsi con uno o più unità intelligenti di I/O, quali ad esempio SPSys (descritto in seguito), o altro tipo di strumentazione di uso generale. MSITel é stato progettato e testato per rispondere alle specifiche dei sistemi a bordo di palloni stratosferici. MSITel fornisce il controllo remoto attraverso un sistema satellitare e relativo modem specifico. Tutti i sistemi satellitari (e terrestri) sono supportati senza modifiche h/w e con facili adattamenti s/w. MSITel fornisce diversi canali di I/O, sia analogici che digitali, per un diretto controllo di strumentazione esterna. Quattro uscite digitali sono in grado di pilotare attuatori da 1 A gestiti da h/w e logica hardware e software di sicurezza, adatti ad esempio per: distacco del pallone, sgancio di zavorra, etc.. Tutte le uscite digitali sono protette contro extratensioni ed integrate di 10 msec (aggiustabile). La comunicazione con apparecchiature esterne avviene attraverso RS-232 e/o IEEE485. La versione realizzata e qualificata utilizza modem IRIDIUM della NAL Research con GPS (mod. A3LA) ed ha le seguenti caratteristiche principali:

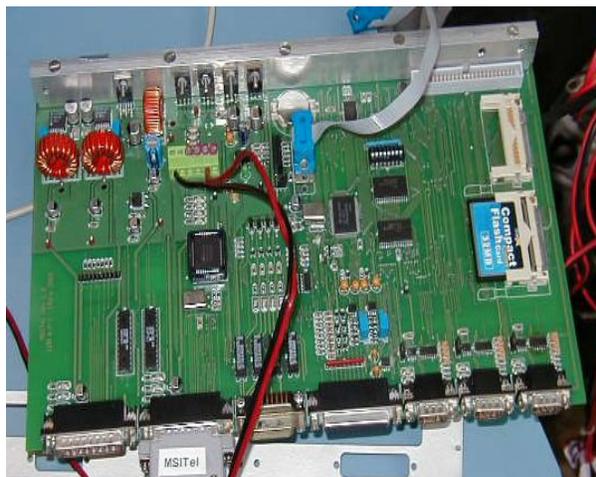


Fig. 3 MSITel durante i test.

da h/w e logica hardware e software di sicurezza, adatti ad esempio per: distacco del pallone, sgancio di zavorra, etc.. Tutte le uscite digitali sono protette contro extratensioni ed integrate di 10 msec (aggiustabile). La comunicazione con apparecchiature esterne avviene attraverso RS-232 e/o IEEE485. La versione realizzata e qualificata utilizza modem IRIDIUM della NAL Research con GPS (mod. A3LA) ed ha le seguenti caratteristiche principali:

- Gestione di 2 modem IRIDIUM
- Polling della strumentazione esterna sia con comandi che con procedure pre-definite dall'utente (special macro-language). Comunicazione seriale (RS232, IEEE485 standard).
- Acquisizione di dati dalle I/O locali definita da macro-language.
- Memorizzazione dei dati acquisiti su supporti non-volatili.
- Invio dei dati acquisiti attraverso il canale satellitare definito alla stazione di terra con uno speciale protocollo (formato di telemetria) definito dal macro linguaggio (down-link telemetry).
- Esecuzione di comandi ricevuti da terra (up-link telemetry).

#### 2.1.1 Maggiori dettagli tecnici.

Tutti i dati acquisiti dal sistema, anche se non trasmessi a causa del livello di priorità, sono comunque memorizzati su *compact flash* per una capacità che con le attuali *flash* supera i 6 Gbytes (o 12 Gbytes). Riducendo a metà la capacità di immagazzinamento è possibile implementare una struttura di salvataggio dati del tipo *fault tolerance* in quanto i dati vengono scritti, in questo caso, contemporaneamente su due *flash-card* separate.

Un *realtime clock* fornisce la temporizzazione assoluta associata con la memorizzazione dei dati stessi. E' quindi possibile avere una sicura correlazione temporale sugli eventi registrati.

Il collegamento verso Iridium, uno principale ed eventualmente uno di riserva, è fatto tramite rs-232 a nove fili (*hardware handshake*) e ogni "terminale" è alimentato in maniera autonoma.

Gli I/O a disposizione sono:

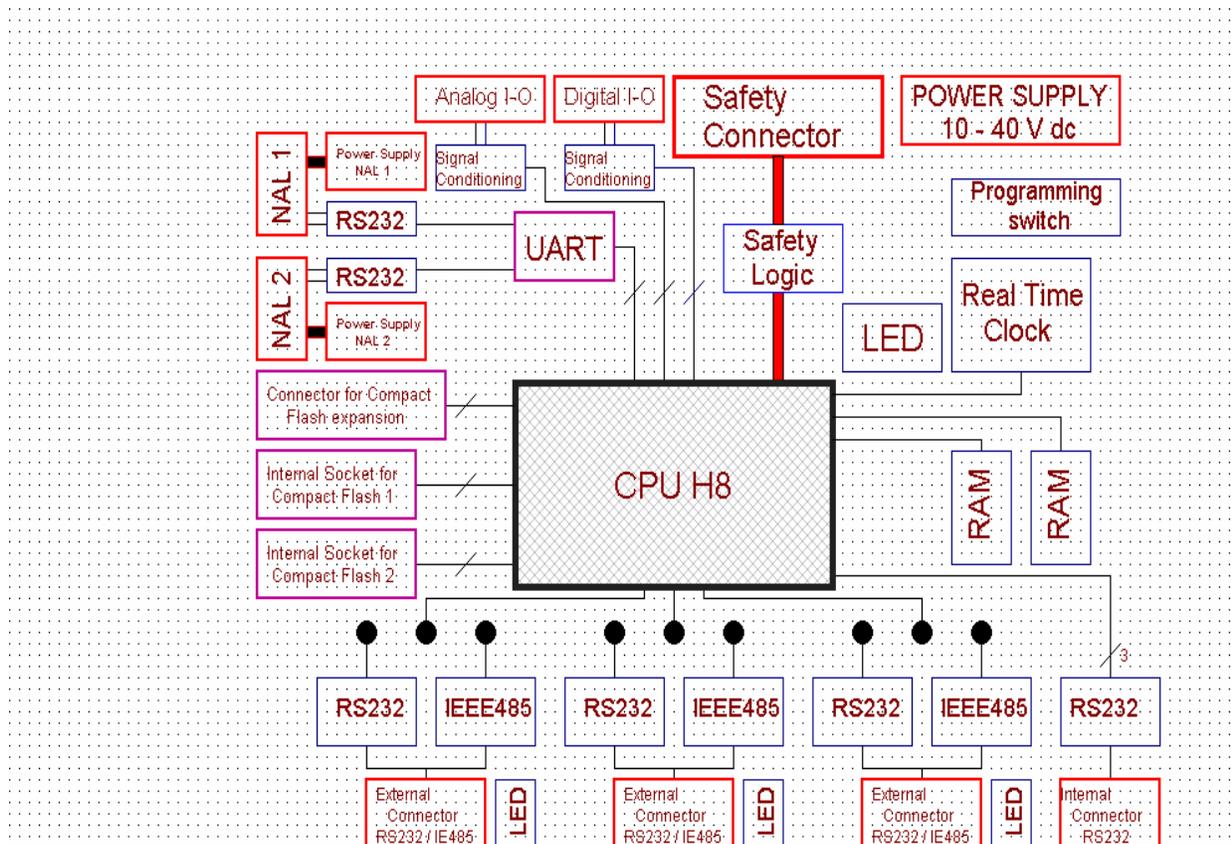
- 1) 8 ingressi (protetti) digitali (0-5 Volt)
- 2) 6 uscite (open collector) digitali (0-40 Vcc )
- 3) 2 x10 bit ingressi analogici (0-10V by h/w setting)
- 4) 2x8 bit uscite analogiche (0-8 V by h/w setting)
- 5) 4 uscite di "alta affidabilità" (alto grado di protezione h/w e s/w)

Sono disponibili inoltre un sensore della tensione di alimentazione ed un sensore della temperatura di lavoro.

- Tensione di alimentazione compresa tra 10 e 40 Vcc
- Temperatura di funzionamento -40 °C +70 °C
- Pressione di funzionamento  $\geq 1$  mbar
- Dimensioni del PCB 323 x 189 x 35 mm

MSITel é disponibile in due versioni: standalone e main-board da integrarsi in un rack con altre unità come moduli di controllo alimentazione SPSYs o altro.

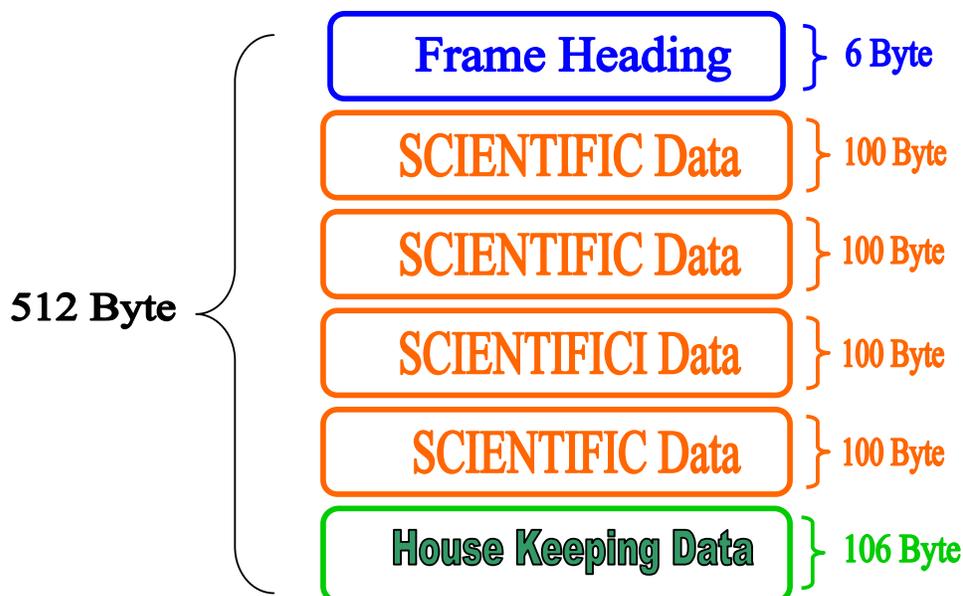
## Schema logico



### 2.1.2 La Telemetria

Il modulo MSITel è stato concepito per generare un flusso di dati verso terra in modo continuo ed in real-time, massimizzando la bitrate del canale satellitare Iridium. L'insieme delle informazioni (dati di monitor MSITel e dati scientifici provenienti dai sottosistemi gestiti da MSITel) vengono inserite in una apposita struttura dati (pacchetto di telemetria) che viene salvata a terra, decompressa in tempo reale e visualizzata dal software di Housekeeping. Attraverso questo software si ottiene un completo controllo del sistema remoto ed è possibile la correzione dei parametri in tempo reale con invio di telecomandi (possibile grazie al canale Iridium che è completamente full-duplex).

Il pacchetto di invio a terra in cui sono contenuti i dati ha dimensioni preassegnate. Si tratta di gruppi di 512 byte trasmessi alla velocità nominale di 2400 bit al secondo. In esso sono contenuti i dati scientifici ed i dati relativi allo status del sistema (dati di house-keeping). La distribuzione e l'ordine della trasmissione segue una struttura predefinita, sintetizzata nel seguente schema:



Come si nota la struttura di invio risulta divisa in 3 zone:

- Un Header della dimensione di 6 bytes. Marca di inizio pacchetto.
- 4 blocchi da 100 bytes l'uno, in cui sono inseriti i dati scientifici.
- 106 bytes finali, dove sono inseriti i dati di house-keeping (MSITel).

L'ultimo gruppo di 106 byte è in realtà più dinamico, caratterizzando questo tipo di filosofia di progettazione. Se per esempio un blocco di dati scientifici viene trasmesso in maniera errata, il sistema permette di recuperarli, senza inficiare i sottopacchetti scientifici. Qualora richiesto, la

struttura dati di house-keeping può accogliere precedenti pacchetti scientifici errati, in modo da consentirne il recupero.

## 2.2 Modulo gestione potenza (SPSys)

Il sistema SPSys (Solar Power System, fig.4) è concepito come gestore della corrente fornita da pannelli solari e, in unione a tre gruppi di batterie tampone, per fornire potenza ad un payload in ambiente stratosferico. La principale caratteristica di SPSys è di essere direttamente interfacciabile ad un sistema di Telemetria attiva come MSItel. Inoltre è previsto che lavori con altre unità dello stesso tipo, sino ad un massimo di 14. Nella configurazione massima (14 unità) gestisce sino a 3.6 Kw @24V cc essendo in grado ogni unità di gestire max 10A@24V nel modo pre-switching e il doppio in modo switch di corrente. SPSYS è gestito da un microcontrollore che monitorizza e decide il modo di ricarica di ogni batteria in funzione della temperatura delle stesse. Può operare sia in modo automatico che manuale, obbedendo cioè a direttive esterne inviate tramite telecomandi (up-link). Ogni modulo è collegato elettricamente con i tre gruppi di batterie tramite tre interruttori elettronici mosfet.



Fig. 4 Il modulo SPSys durante i test.

SPSYS è gestito da un microcontrollore che monitorizza e decide il modo di ricarica di ogni batteria in funzione della temperatura delle stesse. Può operare sia in modo automatico che manuale, obbedendo cioè a direttive esterne inviate tramite telecomandi (up-link). Ogni modulo è collegato elettricamente con i tre gruppi di batterie tramite tre interruttori elettronici mosfet.

- **Funzionamento in modo Automatico**

In modo *pre-switching*, che adegua “l’impedenza del pannello solare” alle batterie, i tre interruttori elettronici sono normalmente abilitati e il  $\mu P$  gestisce la TENSIONE d’uscita del *pre-switching* per fornire la massima CORRENTE di carica alle batterie e quindi al *payload*.

Il  $\mu P$  controlla il raggiungimento della carica totale delle batterie leggendone corrente e tensione tramite sensori esterni e quindi pone le batterie stesse in modo “tampone” regolando la tensione al valore previsto (ad esempio 13,3V@25C per batterie a 12V).

Se il *pre-switching* è disabilitato allora il  $\mu P$  abilita alternativamente gli *switch a mosfet* in funzione dello stato di carica delle batterie (sempre in funzione della temperatura).

- **Funzionamento in modo Manuale**

Tutte le decisioni sono comandate da telecomandi attraverso i canali di I/O

### 2.2.1 Parallelizzazione del Sistema

In questa configurazione, una delle 14 unità che operano in parallelo svolge la funzione di *master* e provvede a :

- a) gestire i moduli collegati che si pongono in configurazione *slave*, cioè come in modo manuale
- b) gestire il sistema di telemetria (down/up) con i dati di tutte le unità

c) in caso di avaria del *master*, attivarne uno secondario

## 2.2.2 Input-Output

Il  $\mu\text{P}$  di SPSys elabora sino a 32 I/O, alcuni dedicati al monitoraggio e funzionalità del sistema stesso, altri a disposizione dell'utente.

Lo scambio di dati con l'unità di telemetria MSITel avviene tramite una connessione RS232.

Il collegamento tra i vari moduli è effettuato invece in IEE485.

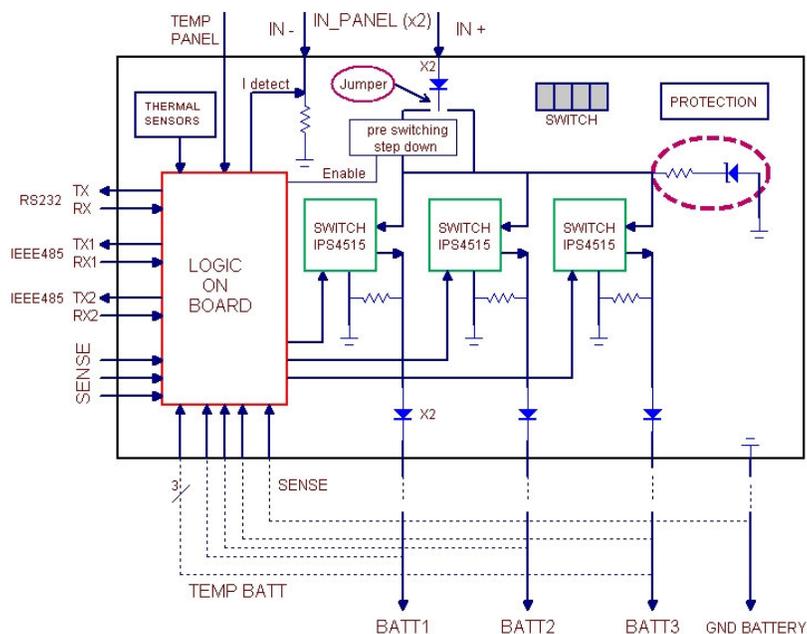
Il sistema è autoalimentato tramite le batterie collegate e i pannelli solari. La minima tensione richiesta per il funzionamento è di circa 8V.

## 2.2.3 Principali caratteristiche tecniche

- Tensione minima richiesta per operare: almeno una sorgente di energia con una tensione >8V (da una batteria o da un Pannello fotovoltaico)
- Tensione di ingresso massima all'ingresso: 45 Vcc
- Corrente max gestita: 10A (pre-switching abilitato) o 20A (pre-switching disabilitato)
- Batterie: max tre gruppi da 24V o 12 V tipo Gel o Piombo
- Protocollo di comunicazione verso la telemetria: RS232
- Protocollo di comunicazione interscambio dati tra moduli: IEE485
- Dissipazione di energia con Input solare @5 A: < 5Watt
- Temperatura di funzionamento: -40 °C +70 °C
- Pressione ambiente:  $\geq 1$  mbar

SPSys è disponibile in due versioni: *standalone* o *main-board* da integrarsi in un rack con altre unità, come ulteriori moduli di controllo alimentazione SPSys o MSITel o altro.

**Schema logico**

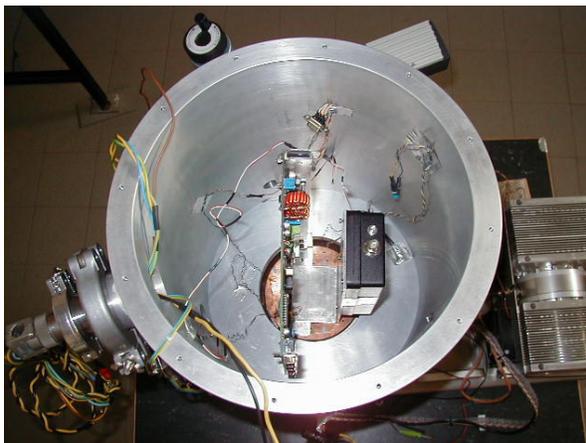


### 3. Test Effettuati.

Nell'anno 2003 e nel 2004 sono stati effettuati test di qualifica in termovuoto di tutti i dispositivi sopra citati.

Il modulo di telemetria costituito dalla scheda MSITel e dal modem NAL è stato testato in vuoto per analizzare le variazioni delle loro caratteristiche elettriche (alimentazioni, correnti), comportamento dei componenti elettronici, e verificarne il comportamento durante il link con IRIDIUM tramite invio/ricezione di TC/TM. In altre parole il modulo di telemetria è stato testato in condizioni assai più elevate di quelle operative. Nella fig. 5 si osserva un dettaglio dell'allestimento dei test in vuoto.

L'allegato A riporta descrizione e risultati dei test conclusi con successo.



*Fig. 5 MSITel e modem NAL A3LA-IG durante i test in termo-vuoto.*

Inerentemente al modulo di gestione potenza, si è partiti dalla cella solare, passando al modulo solare (insieme di 10 celle) per concludere con il test della scheda SPSys, osservando gli effetti indotti da variazioni termiche e dalla presenza di vuoto su tali elementi. In altre parole, vista l'importanza della sezione di potenza si è deciso di testare passo passo ogni elemento.

Il successo di tali test ha portato alla realizzazione di un pannello solare costituito da 7 moduli fotovoltaici ognuno dei quali composto da 10 celle solari.

Il pannello durante un test in ambiente, interfacciato a SPSys e ad un gruppo di 2 batterie, è visibile in figura 6. I dettagli dei test sono visibili negli allegati B e C.



*Fig. 6 I test del sistema SPSys integrato con pannello fotovoltaico e batterie*

## **Test in vuoto del modulo di telemetria: effetti termici**

Macculi C.<sup>[1]</sup>, Ramponi M.<sup>[1]</sup>, Ventura G.<sup>[1]</sup>, Cortiglioni S.<sup>[1]</sup>,  
Cordasco S.<sup>[2]</sup>, Ronchi E.<sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> CNR – IASF, sezione di Bologna, via Gobetti 101, 40129 – Italy

<sup>[2]</sup> LEN s.r.l., Chiavari (Ge), via S. Andrea di Rovereto 33, 16043 – Italy

### **Abstract**

In questo report verranno mostrati gli effetti termici indotti dal test in vuoto sul modulo di telemetria costituito dalla scheda di gestione MSITel e dal modem NAL. Tale test di qualifica è stato effettuato presso i laboratori del CNR istituto IASF sezione di Bologna. Il modulo ha lavorato bene non mostrando criticità, ed il suo riscaldamento è limitato.

### **Introduzione**

Il test in vuoto del modulo di telemetria nasce dalla necessità di utilizzare un sistema, non pressurizzato, in grado di inviare/ricevere dati e telecomandi alloggiabile su un pallone stratosferico la cui quota di galleggiamento è pari a circa 40 Km. La pressione residua esterna è circa 1 mbar, per cui risulta necessario testare in vuoto il prototipo della scheda di telemetria progettata, realizzata e fornita da LEN ed il modem NAL interfacciabile solo alla costellazione di satelliti IRIDIUM<sup>1</sup>. Solitamente gli effetti del vuoto su componentistica elettronica risultano in guasto di componenti elettronici (es. condensatori) e riscaldamento dovuto ad inefficiente scambio di calore a causa della convezione fortemente ridotta rispetto alle condizioni ambiente.

Tale test, eseguito nel Settembre 2004 presso il CNR istituto IASF sezione di Bologna, costituisce una qualifica di laboratorio del modulo di telemetria.

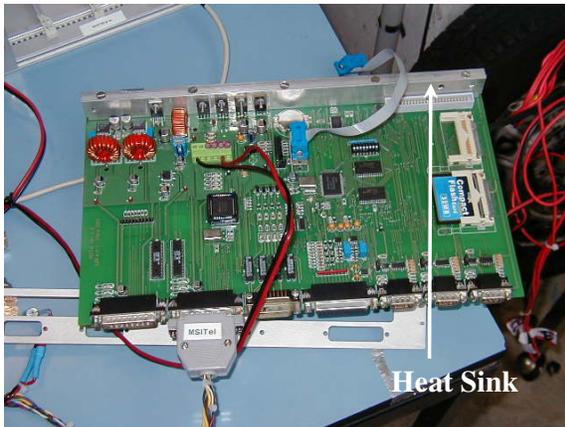
### **Preparazione del test: alloggiamento dispositivi e strumentazione adottata**

Il modulo di telemetria è stato inserito all'interno di un criostato costituito da una camera da vuoto e da un cryocooler meccanico, quest'ultimo non utilizzato durante il test.

La scheda MSITel ed il modem NAL sono visibili in Fig. 1.

---

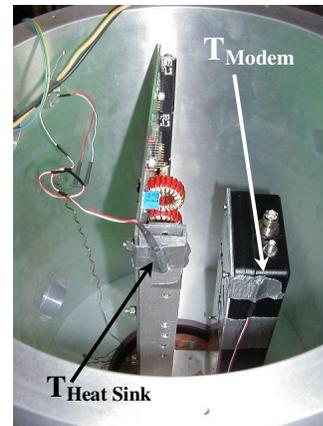
<sup>1</sup> La scheda MSITel della LEN è adattabile a qualunque piattaforma TLC.



**Fig. 1 – Scheda MSITel per gestione TM/TC e modem NAL che costituiscono il modulo di telemetria.**

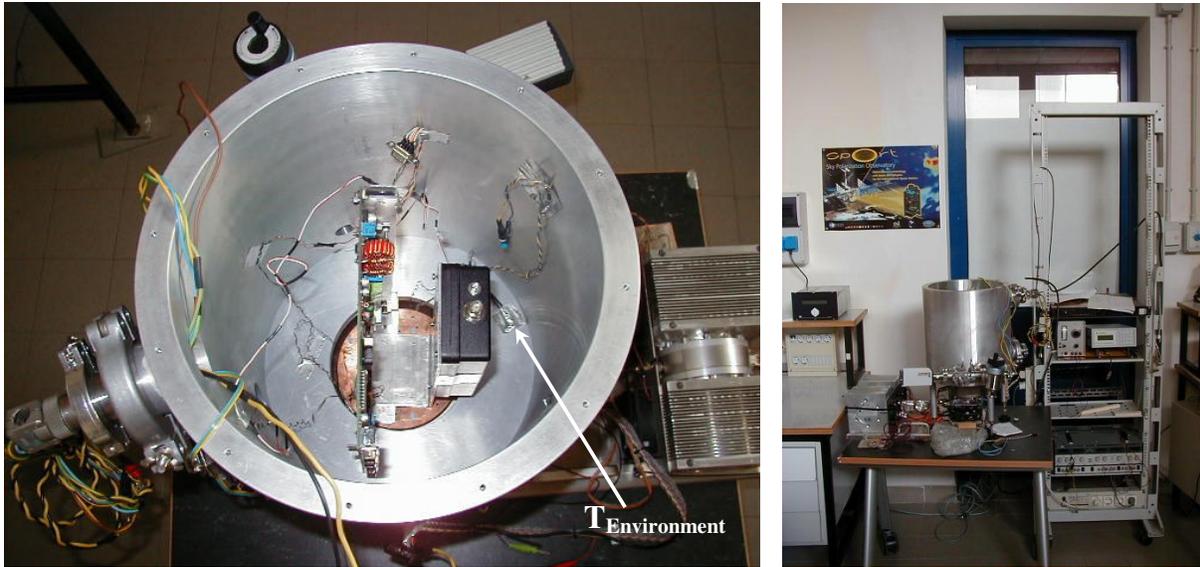
**Il dissipatore termico in alluminio della scheda MSITel è visibile come Heat Sink.**

Essendo presenti dei transistor di potenza sulla scheda elettronica, ivi è stata inserita una pista termica di alluminio (Heat Sink) per dissipare il calore prodotto. Montato il modulo sul supporto meccanico opportunamente costruito (vedi Fig. 2), è stato poi alloggiato nella camera come si osserva dalle Figg. 2 e 3.



**Fig. 2 – Accoppiamento meccanico tra scheda e modem ed inserimento nella camera da vuoto.**

**È visibile il supporto in alluminio appositamente costruito.  $T_{Heat\ Sink}$  e  $T_{Modem}$  individuano i termometri alloggiati sul dissipatore e sul modem, rispettivamente.**



**Fig. 3 – Dettaglio della camera con i passanti da vuoto per le alimentazioni ed i cavi delle antenne IRIDIUM e GPS. Rack di alimentazione per il modulo di telemetria.  $T_{Environment}$  individua il termometro atto a misurare la temperatura ambiente.**

La strumentazione adottata per questa analisi è:

- 1) Pompa rotativa bistadio VARIAN DS402 ( $18 \text{ m}^3/\text{h}$ , vuoto residuo  $\sim 10^{-2}$  mbar)
- 2) Vacuometro digitale ITR90 Leybold ( $1000 - 5 \cdot 10^{-10}$  mbar)
- 3) Raccorderia da vuoto, valvola a spillo per rientro aria DN25, valvola ad angolo DN25
- 4) Temperature monitor model 218E Lakeshore
- 5) Alimentatore stabilizzato SORENSEN DCS 33 – 33 ( $33\text{V}@33\text{A}$ , 1kW)

### Il test

Prima di effettuare il vuoto è stato attivato il link con IRIDIUM e verificato, con il modulo inserito all'interno della camera a temperatura e pressione ambiente, la ricezione e l'invio di telemetria e telecomandi. A quel punto è partita l'acquisizione dei dati. Non osservando nessun tipo di problema si è evacuata la camera attraverso la pompa rotativa, e leggendo contemporaneamente il valore di vuoto dal vacuometro digitale è stato possibile portare il modulo in condizione di pressione di 1 mbar. Per mezzo di una valvola ad angolo il vuoto viene realizzato con qualunque velocità e mantenuto, per questo tipo di test, al livello desiderato di 1 mbar.

Durante il test, iniziato alle ore 14:12 e concluso alle ore 17:32, si sono continuamente controllati gli assorbimenti dei dispositivi in vuoto<sup>2</sup> ed il link con IRIDIUM. Nell'ultima ora di test è stata spenta e riaccesa 2 volte l'alimentazione generale ed è stata attaccata la scheda SPSys di gestione dei pannelli solari per verificare anche il comportamento del modulo di telemetria mentre subisce improvvisamente una perdita di alimentazione e gestisce una unità esterna.

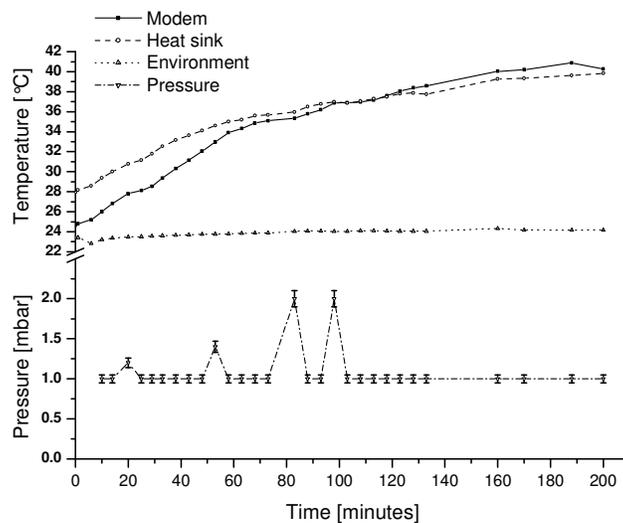
Si è scelto di monitorare la temperatura della scatola del modem ( $T_{modem}$ ), del dissipatore termico della scheda ( $T_{Heat Sink}$ ) e dell'ambiente ( $T_{Environment}$ ).

La Tabella 1 mostra i valori acquisiti durante un run di vuoto durato più di 3 ore, invece in Fig. 4 è mostrato il loro andamento temporale.

<sup>2</sup> MSITel:  $10\text{V}@100\text{mA}$ ; NAL:  $4.9\text{V}@100\text{mA}$  (stand by),  $4.9\text{V}@300\text{mA}$  (on line),  $4.9\text{V}@2.5\text{Amax}$  (TX/RX)

Time [min]	T <sub>Modem</sub> [°C]	T <sub>Heat Sink</sub> [°C]	T <sub>Environment</sub> [°C]	Pressure [mbar]	Comments
0	24.67	27.92	23.42	1000	
1	24.79	28.17	23.42	500	
6	25.20	28.57	22.83	80	
10	26.00	29.37	23.22	1	Ready
14	26.80	30.01	23.36	1	
20	27.81	30.78	23.48	1.2	
25	28.12	31.16	23.52	1	
29	28.53	31.80	23.56	1	
33	29.36	32.54	23.61	1	
38	30.32	33.15	23.65	1	
43	31.14	33.62	23.69	1	
48	32.05	34.12	23.75	1	
53	32.97	34.61	23.77	1.4	
58	33.90	35.01	23.78	1	
63	34.31	35.20	23.84	1	
68	34.87	35.60	23.87	1	
73	35.10	35.67	23.88	1	
83	35.34	35.97	24.04	2	
88	35.78	36.49	24.08	1	
93	36.19	36.77	24.07	1	
98	36.87	37.00	24.04	2	
103	36.90	36.86	24.03	1	
108	36.96	37.04	24.10	1	
113	37.16	37.29	24.11	1	
118	37.58	37.49	24.08	1	
123	38.04	37.78	24.06	1	
128	38.38	37.87	24.06	1	
133	38.57	37.75	24.05	1	On/off – On/Off power
160	40.03	39.28	24.33	1	SPSys On
170	40.19	39.34	24.17	1	Power as solar panel
188	40.88	39.62	24.16	1	
200	40.27	39.83	24.18	1	

**Tabella 1 – Valori delle temperature e della pressione acquisiti. L'errore sulla temperatura è 0.01 °C e sulla pressione il 5% sul valore letto.**



**Fig. 4 – Andamento delle temperature e della pressione durante un run di vuoto. Gli errori di lettura sono presenti solo per la pressione poichè sui grafici delle temperature risultano indistinguibili (minori del 1%).**

Dal grafico in Fig.4 viene evidenziato un incremento delle temperature rispetto a quella ambiente. Ciò mostra con certezza che tale incremento è di origine locale e dovuto al riscaldamento sia del modem che della scheda. La pressione è rimasta costante entro 1 mbar come desiderato. Di tutto lo stream di dati della pressione, nel grafico sono stati riportati quelli acquisiti dopo i primi 10 minuti (intorno a 1 mbar) poichè sono quelli ritenuti interessanti per questo test.

La durata del test è stata di circa 3 ore poichè si è atteso che le temperature si stabilizzassero.

Per capire quale fosse la temperatura di regime è stato eseguito un fit di tipo esponenziale sui dati e poi estrapolato il valore all'infinito (valore di regime) delle temperature. Fisicamente il fit esponenziale è giustificato poichè termicamente questi sistemi possono essere visti come degli accumulatori di calore che tentano di dissipare calore verso un riferimento più freddo esterno al loro sistema (la base di rame visibile in Fig. 3 sulla quale è poggiata la staffa di alluminio). Facendo di fatto un'analogia con una rete elettrica è come se si osservasse la carica di un condensatore. La costante di tempo del processo di riscaldamento è direttamente proporzionale alla capacità termica dell'oggetto ed alla resistenza termica (la staffa) che viene offerta al calore per essere dissipato verso l'ambiente.

Il modello temporale adottato è del tipo:

$$T = y_0 + A_1 \left( 1 - e^{-\frac{t}{t_1}} \right) \quad [1]$$

dove  $y_0$  è il valore della temperatura all'istante  $t = 0$ ,  $A_1$  l'incremento totale della temperatura fino al suo valore di regime ed infine  $t_1$  è la costante di tempo del processo di riscaldamento.

In base all'espressione (1), la temperatura di regime risulterà essere:

$$T(t \gg t_1) \cong y_0 + A_1 \quad [2]$$

I grafici in Figg.5 e 6 mostrano il fit aspettato sovrainposto allo stream temporale dei dati di temperatura.

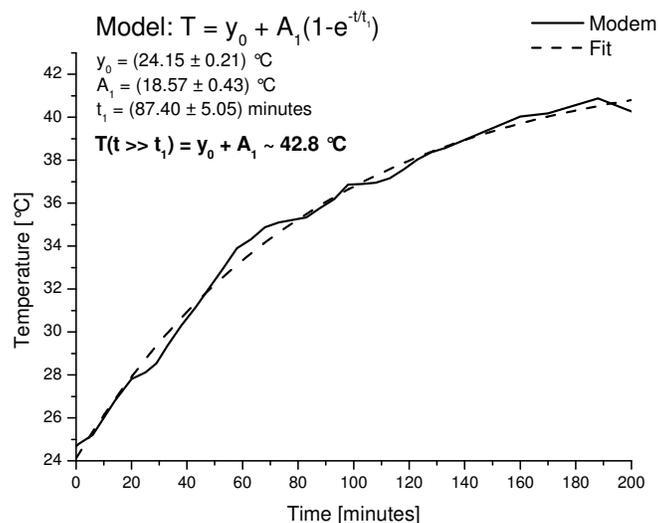
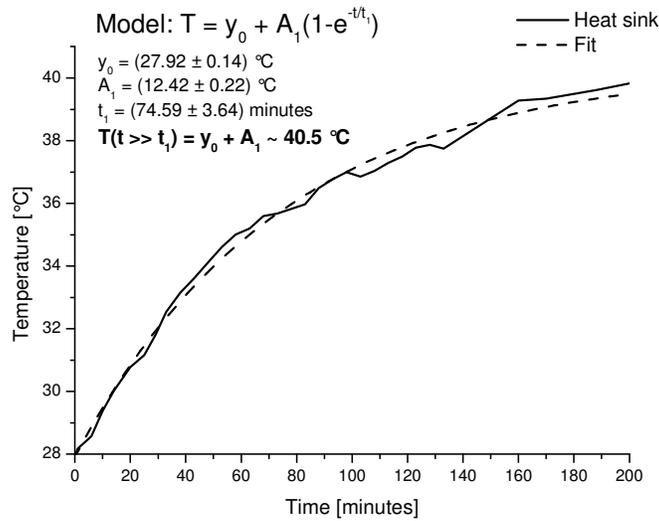


Fig. 5 – Fit sulla temperatura del modem.



**Fig. 6 – Fit sulla temperatura del dissipatore termico della scheda MSITel.**

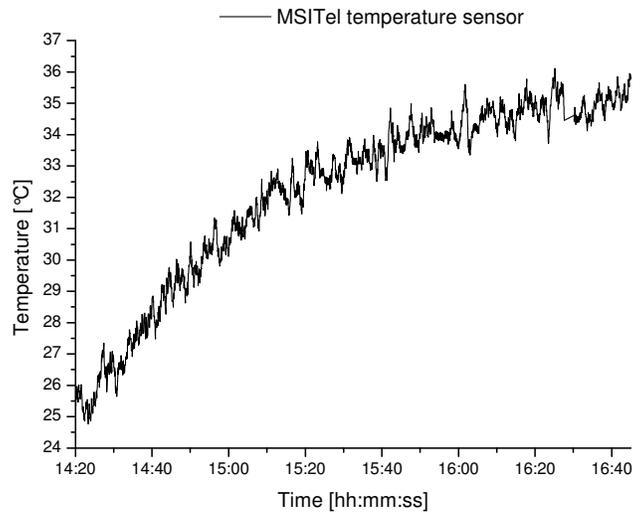
I valori delle temperature di regime risultano essere:

<b>Modem</b>	~ 42.8 °C
<b>Heat Sink</b>	~ 40.5 °C

**Tabella 2 – Temperature di regime dei dispositivi.**

Dai valori in tabella si osserva che questo test, con il modem e la scheda in quella configurazione termo-meccanica, fornisce un risultato confortante: le temperature di regime, in assenza di sostanziale convezione, sono accettabilmente basse. Il calore in eccesso viene sufficientemente scaricato verso un possibile dissipatore esterno, che in questo test è rappresentato dal piattello di rame del cooler sul quale è poggiato tutto. In altre parole, nonostante non si scambi efficientemente calore con l'esterno, le temperature degli oggetti sono basse.

Concluso il test in vuoto è stata estratta la “memoria di bordo”, ovvero la Compact Flash alloggiata sulla scheda MSITel, ed è stata fatta la decodifica per recuperare i dati del monitor di temperatura sulla scheda. La decodifica del file è stata fatta con il decoder dedicato (MSITel CF Dbase Decoder) ed il grafico dei dati è riportato in Fig. 7.



**Fig. 7 – Andamento della temperatura della scheda MSITel. Il sensore termico utilizzato (National LM20) posto sul PCB ha un'accuratezza di  $\pm 2.5$  °C.**

La temperatura raggiunta a regime dalla scheda (circa 37 °C) risulta più che accettabile e ben all'interno dell'intervallo ammesso.

### Conclusioni

Il risultato del test eseguito sul modulo di telemetria costituito dalla scheda MSITel della LEN s.r.l. e dal model NAL è positivo in risposta alla domanda se tale sistema è capace di lavorare in ambiente di pressione ridotta come quella presente in Stratosfera di circa 1 mbar. Con la configurazione termo-meccanica adottata, non ottimizzata per lo scambio termico verso un riferimento freddo esterno, entrambi i dispositivi raggiungono temperature accettabili intorno ai 43°C.

Il modulo non ha mostrato criticità durante i test eseguiti ed ha continuato a lavorare bene anche quando sollecitato sia da spegnimenti improvvisi dell'alimentazione generale sia quando interfacciato con una unità esterna (SPSys), fornita anch'essa da LEN s.r.l., capace di gestire un sistema di alimentazione per voli da pallone stratosferico (batteria, pannelli solari, celle a combustibile).

Questo test rappresenta una qualifica di laboratorio del modulo di telemetria. Tale modulo è ora pronto per essere qualificato attraverso un volo stratosferico.

*Allegato B*

**BaR-SPOrt**  
**Test in vuoto per simulazione in ascesa di pallone di celle  
solari: qualifica termica.**

C. Macculi<sup>1</sup>, G. Ventura<sup>1</sup>, M. Zannoni<sup>2</sup>, P. Calzolari<sup>1</sup>

**Rapporto Interno I.A.S.F./Bo N. 381**  
**Ottobre 2003**

*<sup>1</sup>Istituto I.A.S.F./CNR sezione di Bologna  
Via Gobetti, 101-40129 Bologna*

*<sup>2</sup>Istituto I.A.S.F./CNR sezione di Milano  
Via Bassini, 15-20133 Milano*

## 1. Introduzione e scopi.

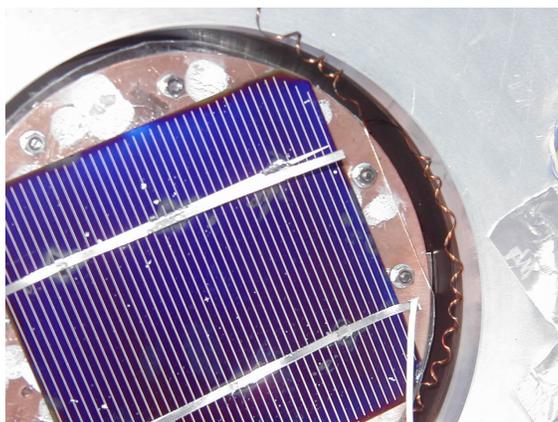
In questo rapporto si presentano i risultati dei test di qualifica termica svolti su una cella solare che costituirà l'elemento base di una serie di pannelli fotovoltaici atti a erogare potenza (~ 1 KW) all'esperimento da pallone BaR-SPOrt (Balloon-borne Radiometers for Sky Polarization Observations)<sup>[1, 2]</sup>.

Questi test sono il frutto di una collaborazione con la ditta esterna<sup>1</sup> alla quale è stato affidato il compito di assemblare tali pannelli, ed alla quale si è deciso di fornire supporto nella progettazione e qualifica di un prototipo.

Scopo di questi test è studiare come cambia l'efficienza elettrica fornita dalla cella al variare della sua temperatura. Si vuole inoltre investigare una sua eventuale rottura in un ambiente simile, in termini di pressione e temperatura, a quello in prossimità dello strato di inversione termica (~ 15 Km). Più in particolare, relativamente al test di rottura, vengono simulati due raffreddamenti, il primo ad evoluzione lenta, tipico della fase di ascesa del pallone ed il secondo ad evoluzione rapida, così da riprodurre uno shock termico.

Le celle adottate sono costituite da silicio monocristallino POWER MAX<sup>®</sup> di dimensioni 10.3 cmx10.3 cm<sup>2</sup>.

In Fig. 1 è visibile una superficie della cella in esame sulla quale sono saldate delle lamine per prelevare la corrente prodotta dalla cella.



**Fig. 1 – Cella solare sotto test. Sono evidenti le piste per la raccolta dei segnali elettrici.**

## 2. Generalità

Si deve simulare l'andamento della temperatura dell'ambiente circostante durante la salita del payload. La dipendenza della temperatura  $T$  dall'altezza  $h$  è di tipo esponenziale:  $T \propto T_0 e^{-\alpha h}$  (vedi grafico NSBF), almeno per altezze fino a 10-15 km [ $\alpha \approx 24 \text{ m}^{-1}$ ,  $h$  in m,  $T_0$  temperatura al suolo in K].

In Fig. 2 si osserva il profilo tipico di temperatura e pressione in funzione della quota, dell'atmosfera standard in U.S.A., evidenziando la regione di interesse per il test.

<sup>1</sup> LEN s.r.l. Laboratori Elettronici, Chiavari (Ge) Italy; len@len.it.

<sup>2</sup> <http://www.solarcellsales.com/catalog/product-detail.cfm?productid=SM110-12P>

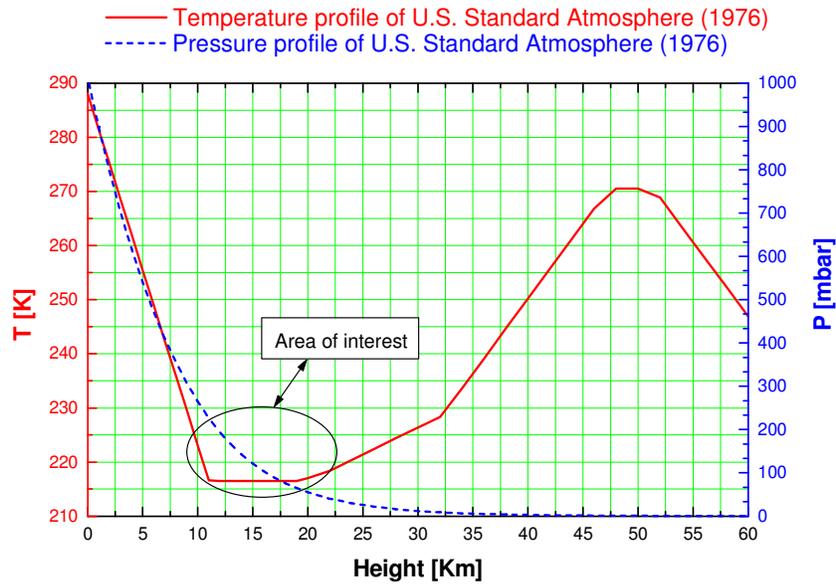


Fig. 2 – Andamento del profilo di temperatura e pressione per atmosfera standard U.S.A.(1976).

La velocità di ascesa del pallone è di circa 160-170 m/min: sono cioè necessarie circa 4 h per raggiungere la quota di galleggiamento di 38 km.

La salita del pallone fino a circa 15 km viene simulata facendo decrescere linearmente la temperatura fino a  $[-60 \div -70]^{\circ}\text{C}$ .  $T(h=0) \approx 15\text{-}25^{\circ}\text{C}$ ,  $T(h=15\text{km}) \approx -60^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T \approx 75^{\circ}\text{C} \Rightarrow$  il gradiente di temperatura che riproduce in maniera accettabile la salita è dell'ordine di  $-75^{\circ}\text{C}/90\text{min} \approx -[0.8 \div 1]^{\circ}\text{C}/\text{min}$  (poiché sono necessari 90 minuti per raggiungere la quota di 15 km). L'ambiente di test della cella è mantenuto ad una pressione di circa 200 mbar ( $\text{N}_2$  gas) controllati attraverso un sensore di pressione digitale. La cella in atmosfera modificata di azoto è alloggiata in una piccola camera da vuoto (Fig. 2a) usualmente adottata come criostato. Per poter illuminare la cella, tale camera è chiusa con una finestra in Plexiglass trasparente nel visibile.

L'arrangiamento sperimentale è basato sull'uso di un refrigeratore meccanico (CRYOCOOLER Polar SC-7 COM<sup>3</sup>, Fig. 2b) che permette di avere sul *dito freddo* una temperatura qualunque impostabile dall'utente<sup>4</sup>. Il controller del refrigeratore permette di impostare la temperatura del dito freddo ( $T_{\text{CF}}$ ) e di monitorare la potenza assorbita dal cooler. Attraverso il controllo PID la  $T_{\text{CF}}$  resta stabile entro qualche decimo di K intorno alla temperatura impostata: all'aumentare dell'ingresso termico (LAMP ON = lampada accesa) aumenta la richiesta di potenza del cooler per garantire la temperatura  $T_{\text{CF}}$ .

Al di sopra del dito freddo è stata installata una piastra circolare di rame sulla quale è collocato un foglio di LEXAN su cui appoggia la cella. L'inserimento del LEXAN (materiale plastico termicamente isolante) è stato previsto poiché si pensa di assemblare l'intero pannello solare su fogli di LEXAN.

<sup>3</sup> <http://www.leyboldvac.de/corporate/index.html>

<sup>4</sup> Il limite previsto da questo modello è di circa 35 K con ingresso termico nullo.



Fig. 2a: Camera da vuoto

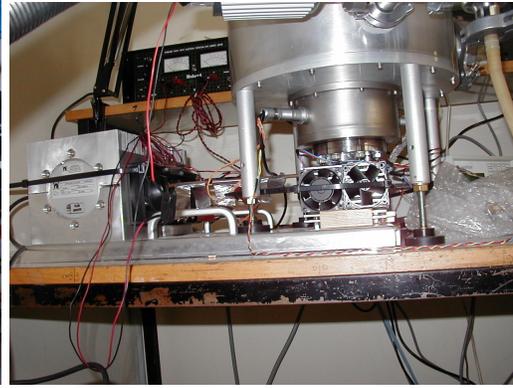


Fig. 2b: Flangia tra cryocooler e camera

La cella solare, illuminata con lampada al tungsteno da 100 W posta ad una distanza di circa 50 cm, è caricata con una resistenza esterna  $(R_L)_{ext} \approx 2.35 \Omega$  ( $I_L \approx 200 \text{ mA}$ ,  $V \approx 0.4-0.6 \text{ Volt}$ ). Sono state acquisite le temperature di quattro termometri<sup>5</sup> e la tensione della cella:

- T7: termometro a contatto con il LEXAN posto sulla superficie della cella esposta alla lampada (LEXAN clamps).
- T6: termometro a contatto con il LEXAN di supporto della cella (LEXAN inferiore); dovrebbe fornire la misura della temperatura più prossima a quella della cella.
- T5: termometro a contatto con la superficie inferiore della piastra di Cu di supporto.
- TCF: termometro a contatto diretto con il dito freddo.

Nelle Figg. 3, 4 e 5 vengono mostrati rispettivamente il setup sperimentale, il metodo usato per vincolare la cella sulla base fredda di rame, ed i principali sensori di temperatura.

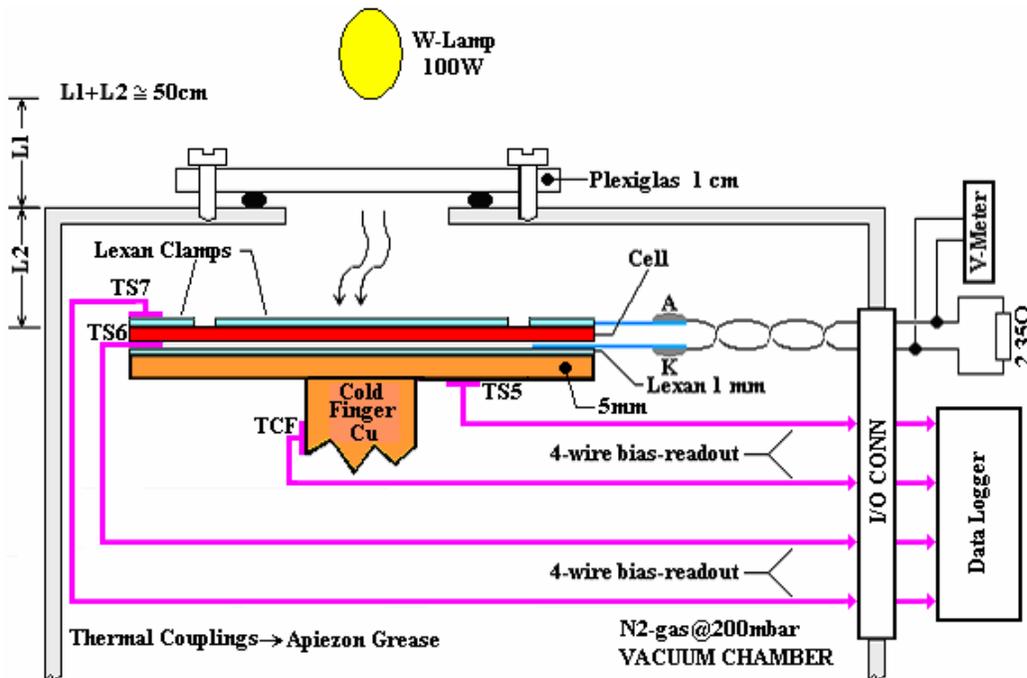


Fig. 3 - Arrangiamento sperimentale.

<sup>5</sup> Lakeshore controller interfacciato ad un VI di LabVIEW dedicato

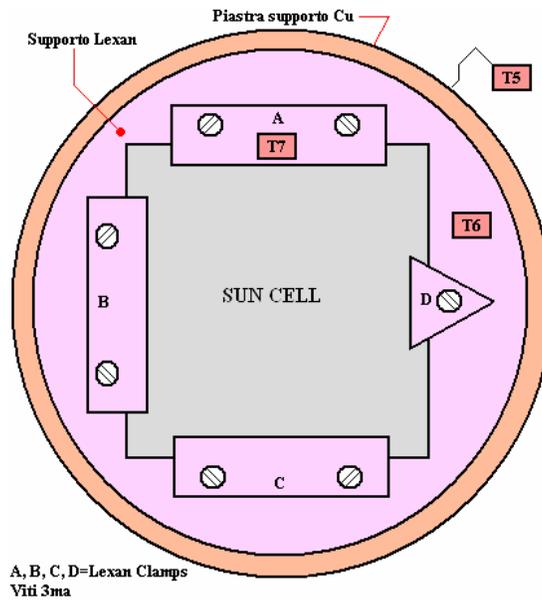


Fig. 4 – Bloccaggio della cella sulla piastra fredda in rame.

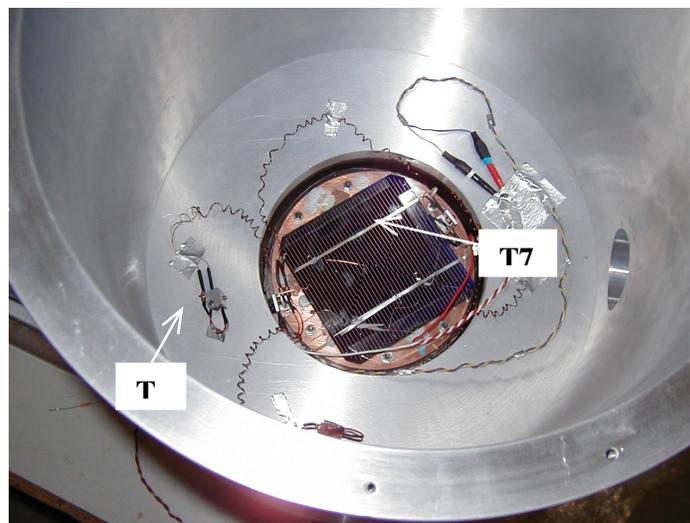


Fig. 5 – Disposizione dei principali sensori temperatura.

### 3. Test relativo all'ascesa del pallone

Nel primo test la cella solare viene sottoposta, in atmosfera residua di azoto (~ 200 mbar), ad un raffreddamento con i tempi tipici di salita di un pallone stratosferico. La Fig. 6 mostra il pannello di controllo del cryocooler durante questa fase.

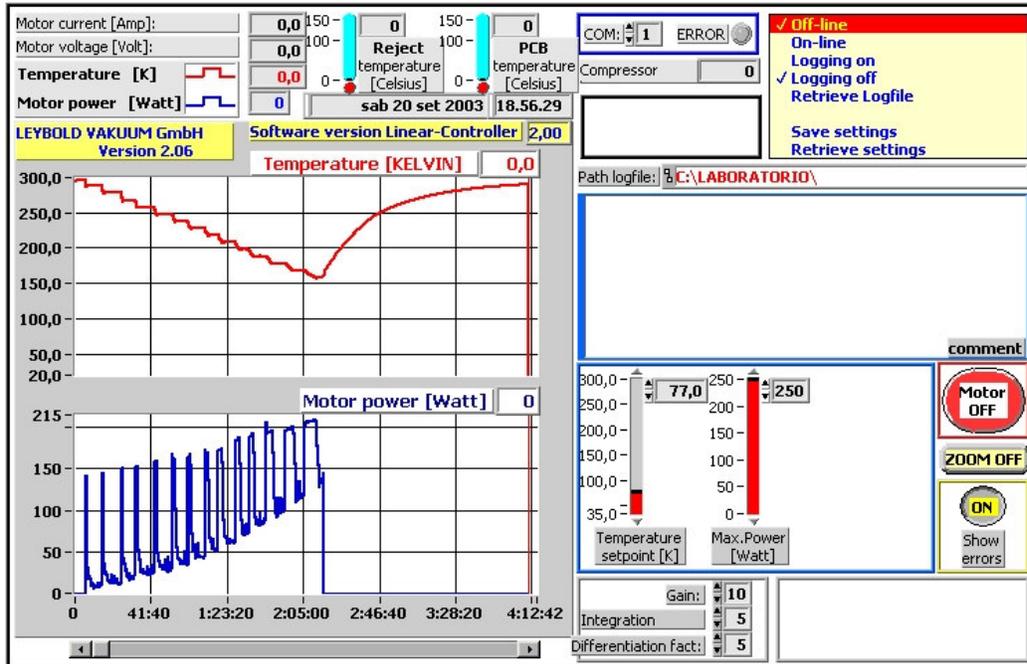


Fig. 6 – Pannello di controllo del cooler: Simulazione della fase di ascesa del pallone con Sorgente luminosa accesa (LAMP ON). Fissata l'intensità luminosa (ingresso termico), al diminuire della  $T_{CF}$  diminuisce l'efficienza frigorifera del cooler, aumentando così la richiesta di potenza elettrica.

Seguono le temperature acquisite e le tensioni corrispondenti, rispettivamente in Fig. 7 e 8. Tali valori sono stati presi esaurito ogni transiente termico.

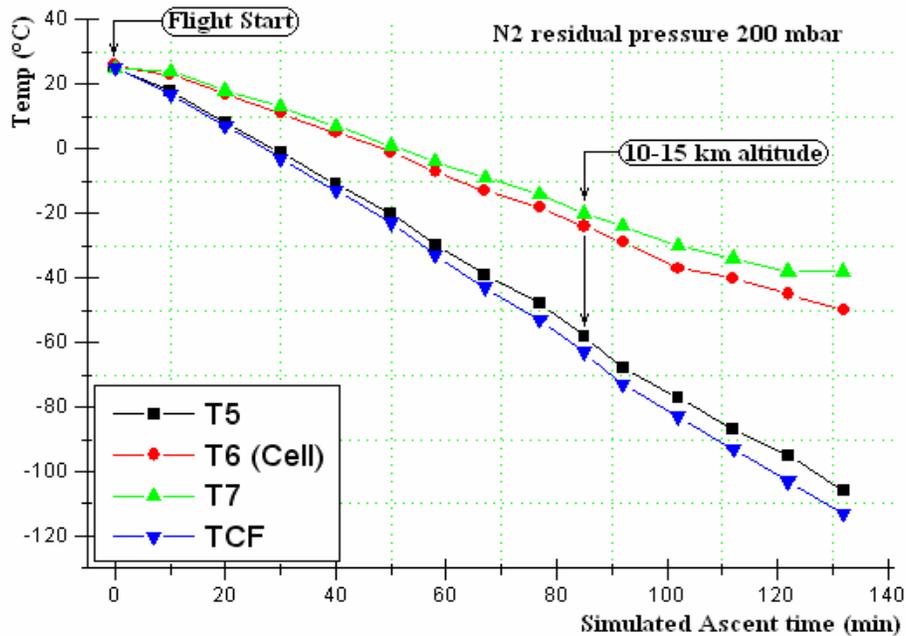


Fig. 7 – Temperature durante l'ascesa simulata.

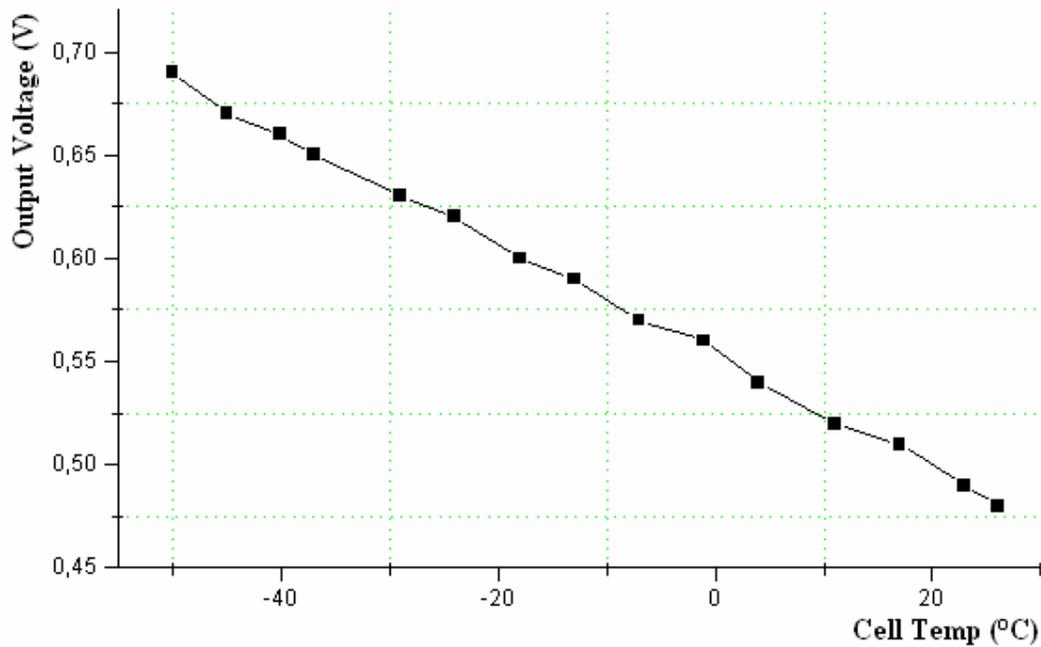


Fig. 8 – Andamento della tensione della cella in funzione della temperatura (T6)

Dal grafico in Fig. 8 si osserva che la tensione aumenta al diminuire della temperatura della cella: una diminuzione di ~ 80 °C dalla temperatura ambiente ha prodotto un aumento di efficienza superiore al 40%.

Nel grafico seguente si osserva un fit lineare eseguito sulle misure di temperatura e tensione ( $V_{load}$  rappresenta la tensione ai capi del carico di 2.35 Ω). Come temperatura di riferimento per la cella, in questo fit è stata adottata la media tra T6 e T7.

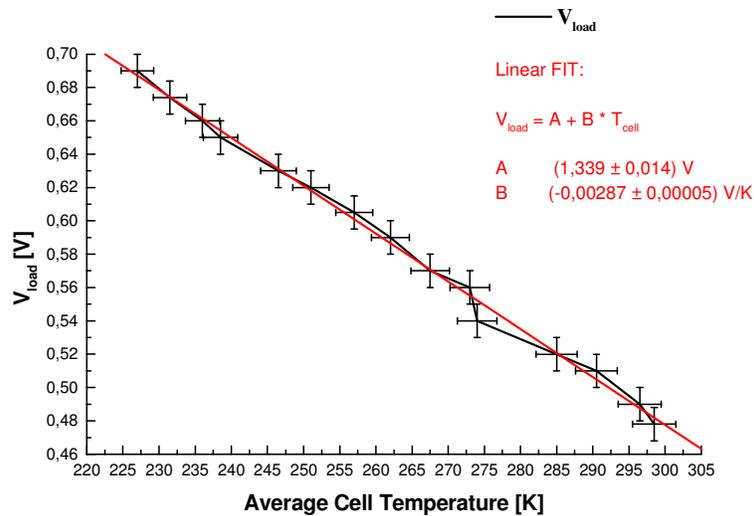


Fig. 9 – FIT lineare sui dati acquisiti. Gli errori sulla temperatura sono 1% dei valori letti, per il voltmetro corrispondono all'ultima cifra decimale.

Dall'analisi fatta sui dati relativi alla tensione di carico si evidenzia, a meno degli errori, il seguente andamento nell'intervallo di temperature [220 ÷ 300] K:

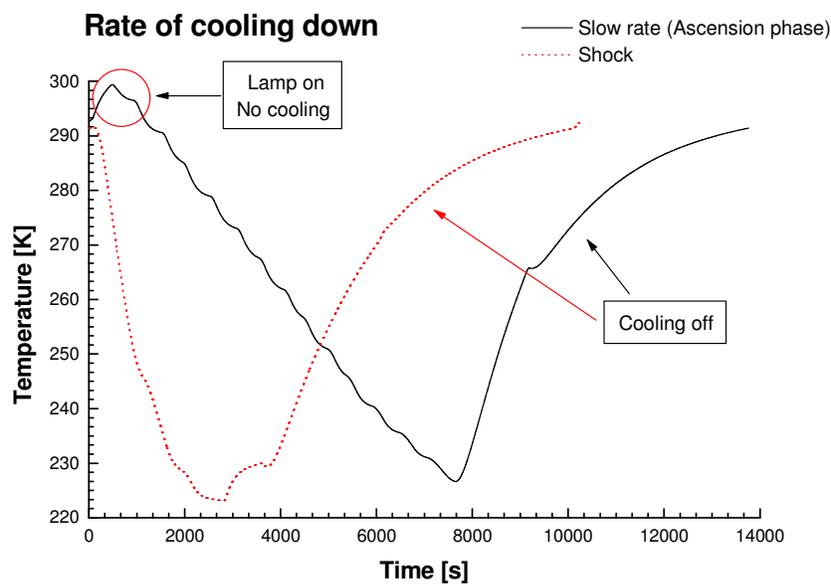
$$V_{\text{load}}(2.35 \Omega) = 1.339 - 0.00287 \cdot T_{\text{cell}}$$

dove  $T_{\text{cell}}$  è la temperatura in Kelvin della cella.

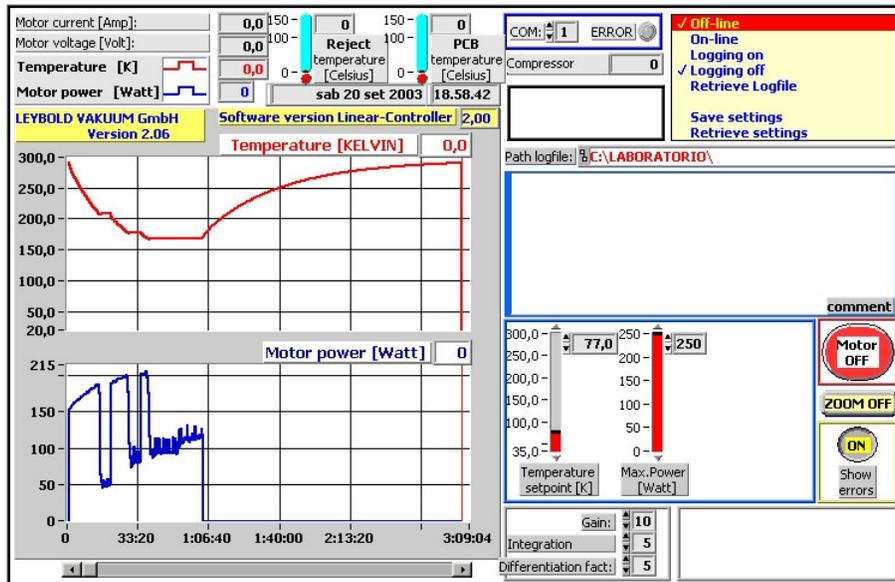
#### 4. Test relativo allo Shock termico

E' stato eseguito un test raffreddando rapidamente la cella per provocarne eventuali rotture (test di perdita).

I grafici seguenti mostrano la velocità con cui si è variata la temperatura rispetto al caso precedente dell'ascesa di pallone, e la richiesta di potenza del cooler (vedi per confronto Fig. 6).

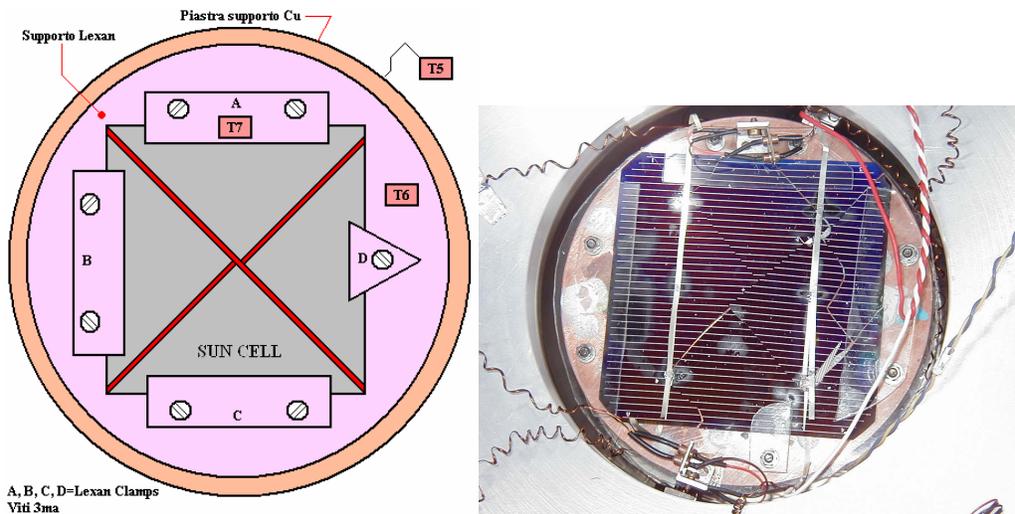


**Fig. 10 – Confronto tra gli andamenti temporali dei raffreddamenti. L'aumento iniziale ( $t < 1000$  s) di temperatura nella fase di ascesa è dovuto al fatto che la sorgente luminosa e' accesa ma il cooler non è attivo.**



**Fig. 11 – Pannello di controllo del cooler: Fase di Shock termico. Andamento della tempertura del dito freddo.**

Lo shock termico (ore 14.20 con  $T_6=25^{\circ}\text{C}$ , ore 15.00 con  $T_6 = -53^{\circ}\text{C}$ ) senza illuminazione ha provocato la rottura della cella lungo le diagonali (vedi Fig. 12). La tensione letta in uscita, con la lampada accesa, è di  $\sim 44$  mV, un ordine di grandezza inferiore alle tensioni lette quando la cella è integra.



**Fig. 12 – Rottura meccanica della cella.**

Si pensa che la rottura durante lo shock termico sia dovuto a come si è ancorata la cella sulla base di LEXAN. Infatti, sono stati adottati dei supporti di LEXAN (A, B, C, e D in Fig. 12). Gli sforzi e le tensioni dovute a deformazioni della cella durante il veloce raffreddamento, venivano scaricate sui vincoli di LEXAN. A causa della rigidità meccanica di questi, la cella ha ceduto.

Evidenziata la rottura, si è deciso di continuare ad illuminare la cella.

Il grafico in Fig. 13 mostra il profilo di temperatura nel tempo, dal raffreddamento alla risalita in temperatura ambiente.

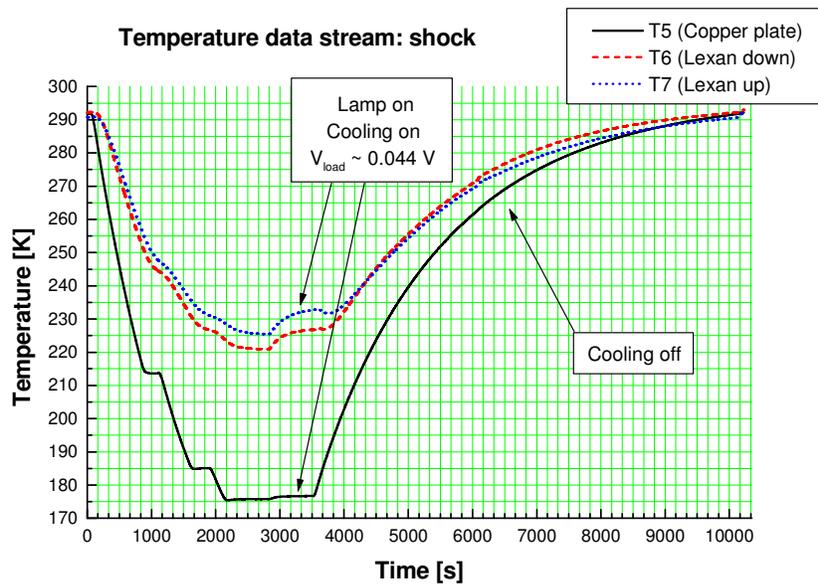


Fig. 13 – Dettaglio profili di temperatura.

E' stato ripetuto il test di shock termico sostituendo la cella e collocandola sulla base di LEXAN senza vincolarla con i supporti. Per compensare la perdita di accoppiamento termico dovuta all'assenza dei vincoli meccanici, si è aumentata la quantità di grasso termoconduttore.

In circa 45 minuti si è proceduto al raffreddamento ripetendo lo stesso profilo precedente (vedi Fig. 14), portando la base di LEXAN alla temperatura di 210K (~ - 63 °C).

A temperatura ambiente la caduta di tensione ai capi del carico è:

$$V_{load} = 0.33 \pm 0.01 \text{ V.}$$

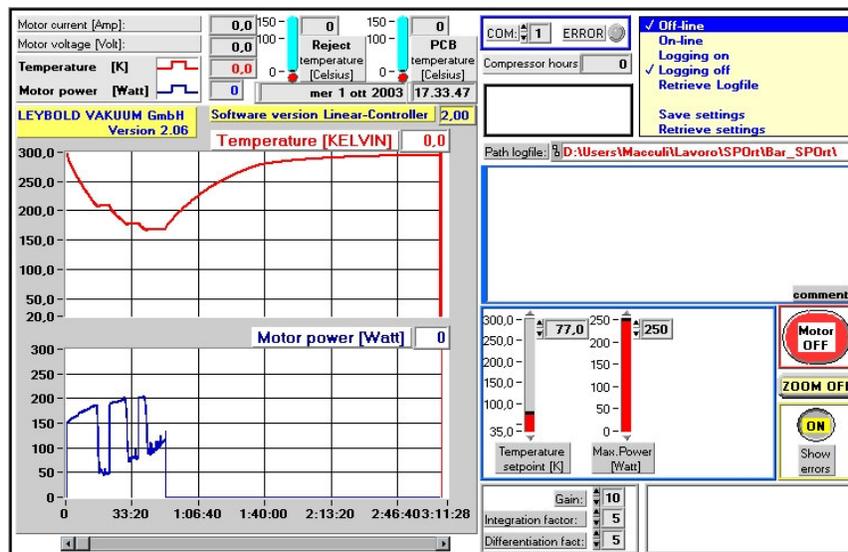


Fig. 14 – Dettaglio profilo di temperatura dello shock termico. Andamento della temperatura del dito freddo.

Irradiando poi la cella con la lampada si è osservato sul carico un segnale di  $V_{load} = 0.56 \pm 0.01 \text{ V}$ . La variazione di segnale rispetto a quello a temperatura ambiente è superiore al 40% come nel caso del test mostrato al paragrafo 3 (test relativo alla fase di ascesa del pallone). In termini assoluti, tale

valore non è direttamente confrontabile con quello in Fig. 9 poiché la cella è diversa e non è ben saldata sulla base in modo da dissipare bene il calore. L'interesse di questo ultimo test risiede solo in una verifica meccanica e non di efficienza ottica.

Il risultato sul test di rottura è stato positivo, non essendosi rotta la cella.

In particolare però, in prossimità della temperatura di 217 K si è verificata la rottura di due punti di saldatura di una pista elettrica evidenziando la criticità di tali contatti.

## 5. Conclusioni

I test condotti sulla cella solare POWER MAX<sup>®</sup> hanno portato ad identificare questa cella come buona candidata per la costruzione di pannelli solari dedicati all'erogazione di potenza per un esperimento in un volo stratosferico.

Sono stati eseguiti due tipi di test sottoponendo la cella agli stress tipici delle condizioni ambientali in prossimità dello strato atmosferico di inversione termica. Questi test sono:

- 1) Verifica della variazione di efficienza di conversione luce-corrente in funzione della temperatura
- 2) Rigidità meccanica

Entrambi i test hanno fornito informazioni interessanti. Attraverso il primo si è constatato l'aumento di efficienza della cella al diminuire della sua temperatura fisica. Il secondo ha evidenziato da un lato la necessità di alloggiare la singola cella in modo che sia libera da vincoli meccanici che in fase di contrazione la possano rompere, e dall'altro la criticità delle saldature delle piste elettriche.

## 6. Bibliografia:

- [1] S. Cortiglioni, G. Bernardi, E. Carretti, S. Cecchini, C. Macculi, C. Sbarra, G. Ventura, M. Baralis, O. Peverini, R. Tascone, S. Bonometto, L. Colombo, G. Sironi, M. Zannoni, V. Natale, R. Nesti, R. Fabbri, J. Monari, M. Poloni, S. Poppi, L. Nicastro, A. Boscaleri, P. de Bernardis, S. Masi, M.V. Sazhin, E. N. Vinyajkin, "*BaR-SPOrt: An Experiment To Measure The Linearly Polarized Sky Emission From Both The Cosmic Microwave Background And Foregrounds*", in 16th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, June 2-5th 2003, St. Gallen, Switzerland, in press.
- [2] Zannoni M., Cortiglioni S., Bernardi G., Carretti E., Cecchini S., Macculi C., Morelli E., Sbarra C., Ventura G., Nicastro L., Monari J., Poloni M., Poppi S., Natale V., Baralis M., Peverini O.A., Tascone R., Virone G., Boscaleri A., Pascale E., Boella G., Bonometto S., Gervasi M., Sironi G., Tucci M., Nesti R., Fabbri R., de Bernardis P., De Petris M., Masi S., Sazhin M.V., Vinyajkin E.N., "*The BaR-SPOrt Experiment*", in Polarimetry in Astronomy, SPIE Symposium 2002 on Astronomical Telescopes and Instrumentation, August 22-28th 2002, Waikoloa, Hawaii, SPIE Proc., 4843 (2003).

## **Test in vuoto di un modulo del pannello solare: effetti termici**

Macculi C. <sup>[1]</sup>, Ventura G. <sup>[1]</sup>, Cortiglioni S <sup>[1]</sup>,  
Cordasco S. <sup>[2]</sup>, Ronchi E. <sup>[2]</sup>

<sup>[1]</sup> CNR – IASF, sezione di Bologna, via Gobetti 101, 40129 – Italy  
<sup>[2]</sup> LEN s.r.l., Chiavari (Ge), via S. Andrea di Rovereto 33, 16043 – Italy

### **Abstract**

In questo report verranno mostrati gli effetti termici e strutturali indotti dal test in termovuoto su un modulo fotovoltaico costituente un elemento del pannello solare sviluppato per il programma BaR-SPOrt. Tale test di qualifica è stato effettuato utilizzando la camera termovuoto presso i laboratori del CNR istituto IASF sezione di Bologna. Il modulo ha lavorato bene non mostrando criticità, le sue caratteristiche tensione corrente sono variate entro qualche per cento e strutturalmente non ha subito danni.

### **Introduzione**

Il test in vuoto del modulo costituito da 10 celle solari POWER MAX<sup>®</sup> della Solar Cell, costituente una sezione del pannello solare realizzato per il programma BaR-SPOrt, nasce dalla necessità di utilizzare un modulo di alimentazione fotovoltaica in grado di lavorare a bordo di un pallone stratosferico la cui quota di galleggiamento è pari a circa 40 Km. A tale altezza la pressione residua esterna è circa 1 mbar e, durante l'ascesa in prossimità dello strato di inversione termica (~10-20 km), le temperature aspettate rispetto a quella standard ambiente possono avere un decremento di oltre 60°C <sup>[1]</sup>. Per cui risulta necessario testare in vuoto il prototipo del modulo fotovoltaico sviluppato da LEN in collaborazione con IASF Bologna.

Verranno analizzate sia le variazioni delle caratteristiche tensione – corrente del modulo sia la sua tenuta strutturale.

Si è scelto di non collegare termicamente il modulo ad una sorgente di calore che potesse tenerlo ad una temperatura non fredda in modo da stressarne termicamente la sua struttura.

Tale test, eseguito nel Ottobre 2003 presso il CNR istituto IASF sezione di Bologna, costituisce una qualifica di laboratorio del modulo fotovoltaico.

### **Preparazione del test: alloggiamento modulo e strumentazione adottata**

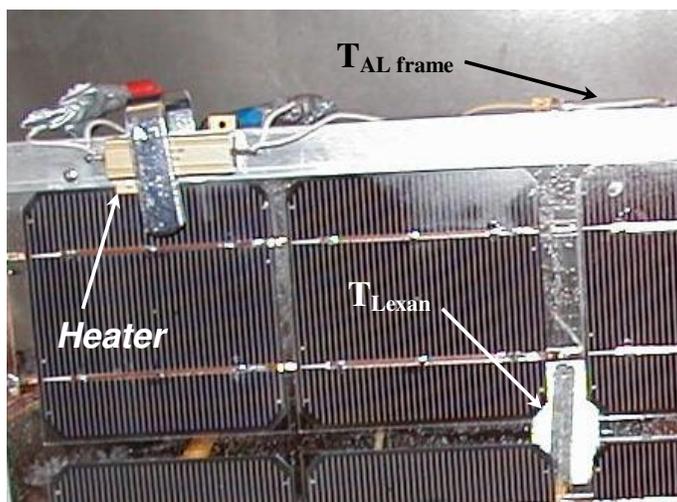
Il modulo fotovoltaico è stato inserito all'interno della camera termovuoto come osservabile dalla seguente Fig. 1.



**Fig. 1 – Posizionamento del modulo fotovoltaico dentro la camera Termovuoto**

Esso è costituito da 10 celle solari inserite tra 2 fogli di Lexan e vincolate, ognuna, sui 4 angoli con punti di colla siliconica. Il tutto è vincolato ad una cornice di alluminio. Il silicone è stato adottato in modo che, sotto eventuali dilatazioni o torsioni della struttura indotte da stress termici, la cella fosse “libera” di rilassarsi strutturalmente<sup>[1]</sup>.

In Fig. 2 vengono mostrati il posizionamento dei sensori di temperatura.



**Fig. 2 – Posizionamento dei sensori di temperatura:  $T_{AL\ frame}$  e  $T_{Lexan}$  individuano le temperature della cornice di alluminio e del lexan.**

I riscaldatori “heater” sono stati inseriti semplicemente per riscaldare in modo più veloce la struttura una volta raffreddata.

La strumentazione adottata è la seguente:

- 1) Camera termostatica per prove temperatura depressione Mod. TY 7000/D (ACS Angelantoni). Ha integrato un sistema di lettura per 2 sensori di temperatura PT100 e per la pressione
- 2) Carico ohmico di 12  $\Omega$
- 3) Oscilloscopio Fluke 196B
- 4) Lampada 32000 lumen per simulazione di illuminazione solare

## Il test

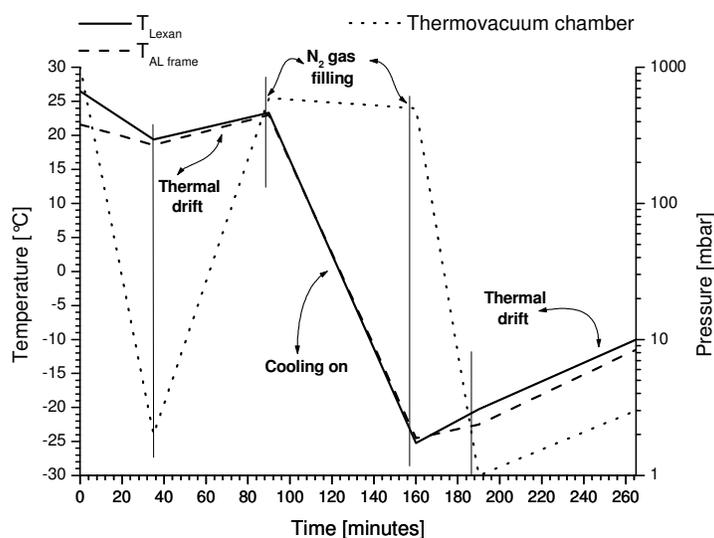
Prima di iniziare il test in vuoto sono stati acquisiti, a temperatura e pressione ambiente, la tensione del pannello e la corrente erogata, chiudendo il modulo su un carico di  $12 \Omega$ . A quel punto è iniziata la procedura di vuoto per la camera attraverso il gruppo di pompaggio dedicato.

Si è scelto di monitorare la temperatura della cornice di alluminio ( $T_{AL \text{ Frame}}$ ) e del foglio posteriore di Lexan ( $T_{Lexan}$ ), la tensione e le correnti erogate dal pannello.

La Tabella 1 mostra i valori acquisiti durante il test durato più di 5 ore, invece in Figg. 3 e 4 è mostrato il loro andamento temporale.

Hour	$T_{Lexan}$ [°C]	$T_{AL \text{ frame}}$ [°C]	$V_{Panel}$ [V]	$I_{Panel}$ [A]	P [mbar]	Comments
12:15	26.5	21.6	1.43	0.117	1011	8/10/2003: Condizioni iniziali
12:50	19.4	18.6	1.41	0.115	2	Vacuum
13:45	23.3	23.0	1.4	0.115	595	N <sub>2</sub> gas filling
14:55	-25.2	-24.5	1.44	0.121	500	Condensation on porthole
15:25	-20.3	-22.5	1.41	0.118	1	Vacuum
16:40	-10.0	-11.5	1.49	0.120	3	Vacuum

**Tabella 1 – Valori delle temperature e della pressione acquisiti. L'errore sulla temperatura è  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$  e sulla pressione il 5% sul valore letto.**



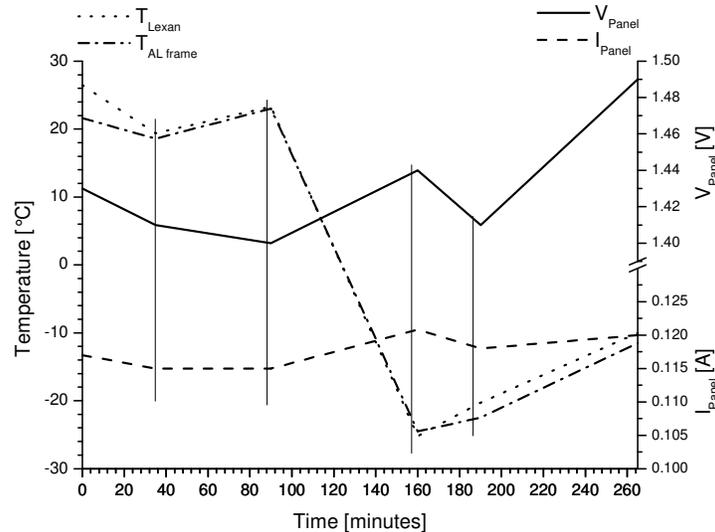
**Fig. 3 – Andamento delle temperature e della pressione durante il test. Le linee continue verticali sono puramente indicative.**

Dal grafico in Fig. 3 si osserva l'andamento delle temperature e della pressione della camera in funzione del tempo. Il primo calo di qualche grado centigrado è semplicemente dovuto al raffreddamento per svuotamento della camera. La successiva deriva termica è indice del riscaldamento, a 1 mbar di pressione, del modulo dovuto all'irraggiamento della lampada esterna che simula il flusso solare. Non essendo il modulo vincolato termicamente ad un dissipatore termico, esso non può dissipare il calore accumulato, alzando di fatto la sua temperatura. Dopo l'inserimento di circa 500 mbar di azoto gas<sup>i</sup>, si osserva il forte decremento di temperatura

<sup>i</sup> In questo tipo di camera il raffreddamento viene realizzato attraverso un gruppo frigorifero. L'azoto gas permette di velocizzare ed uniformare il raffreddamento dei dispositivi ivi inseriti senza generare condensa poiché privo di vapore acqueo.

(maggiore di 50 °C). Tale stress termico è stato indotto in circa 1 ora. Per confronto, la velocità impiegata da un pallone per portare un esperimento del peso di circa 1000 – 2000 kg allo strato di inversione termica è di circa 90 minuti <sup>[1]</sup>.

Il gradiente termico indotto è di fatto paragonabile risultando qui in 50°C/60min  $\cong$  0.8 °C/min. Svuotando infine la camera, il modulo si riscalda attraverso l'irraggiamento della lampada esterna. In ultimo le temperature della cornice di alluminio e del Lexan sono molto simili e seguono lo stesso andamento.



**Fig. 4 – Andamento delle temperature e dei parametri elettrici ( $V_{Panel}$ ,  $I_{Panel}$ ) del modulo solare. Le linee continue verticali sono puramente indicative.**

Per quanto riguarda i parametri elettrici di tensione ( $V_{Panel}$ ) e corrente ( $I_{Panel}$ ) erogata dal modulo verso il carico elettrico, dalla Fig. 4 si osserva che i valori variano entro il 5%. Si deve sottolineare che tali parametri vengono direttamente acquisiti sul carico senza che i segnali vengano in qualche modo “puliti” da dispositivi elettrici intermedi. In altre parole sono segnali grezzi e non puliti come dovranno essere quando verranno forniti al payload scientifico. Tale lavoro varrà espletato da elettronica dedicata.

## Conclusioni

Nel Ottobre 2003 è stato testato in termovuoto un modulo fotovoltaico costituente una sezione del pannello solare sviluppato per il programma BaR-SPOrt da LEN s.r.l.

Tale test è risultato positivo.

Strutturalmente, applicando un gradiente termico di circa 0.8 °C/min, la soluzione meccanica adottata è risultata positiva: il pannello una volta estratto dalla camera all'ispezione visiva non è risultato criccato in nessuna parte, sia dal punto di vista della struttura portante che delle stesse celle. I parametri elettrici sono rimasti sostanzialmente gli stessi entro il 5% del loro valore. Tali fluttuazioni sono imputabili solo a derive termiche poichè una eventuale rottura di una cella avrebbe sensibilmente variato il loro valore.

Questo test rappresenta una qualifica di laboratorio del modulo fotovoltaico.

Tale modulo è ora pronto per essere qualificato attraverso un volo stratosferico.

## **Bibliografia:**

- 1) C. Macculi, G. Ventura, M. Zannoni, P. Calzolari, “*BaR-SPOrt: Test in vuoto per simulazione in ascesa di pallone di celle solari: qualifica termica*”, Rapporto Interno I.A.S.F./Bo N. 381, Ottobre 2003.