



**ThalesAlenia**  
A Thales / Finmeccanica Company *Space*

# ■ Batterie

- ❑ INTRODUZIONE
  - Utilizzo
  - Definizioni fondamentali
- ❑ BATTERIE PRIMARIE
- ❑ BATTERIE SECONDARIE
  - Accenni Batterie NiH<sub>2</sub>
  - Batterie Li-Ion
- ❑ CONSTRAINTS ORBITALI E DI MISSIONE
  - Satelliti GEO
  - Satelliti LEO
- ❑ DIMENSIONAMENTO
- ❑ ESEMPIO
- ❑ FONDAMENTI DI PROCUREMENT

Il sistema batterie ha in carico di:

- Fornire energia durante i periodi di eclisse
- Offrire supporto al solar array per sostenere i picchi di potenza richiesti durante i periodi di sole.

Il sistema batterie viene ricaricato durante le fasi di Sunlight, quando la potenza disponibile dal Solar array eccede la richiesta dei carichi.

Il sistema batterie è costituito da una matrice di celle serie-parallelo.

Il numero delle celle connesse in serie dipende dalla tensione di bus richiesta e dalla massima tensione di cella che è diversa a seconda della tecnologia considerata.

Il numero delle stringhe connesse in parallelo è strettamente dipendente dalle richieste energetiche e di potenza della specifica missione e da caratteristiche (max corrente e capacità) della cella considerata.

### □ **C = CAPACITÀ NOMINALE**

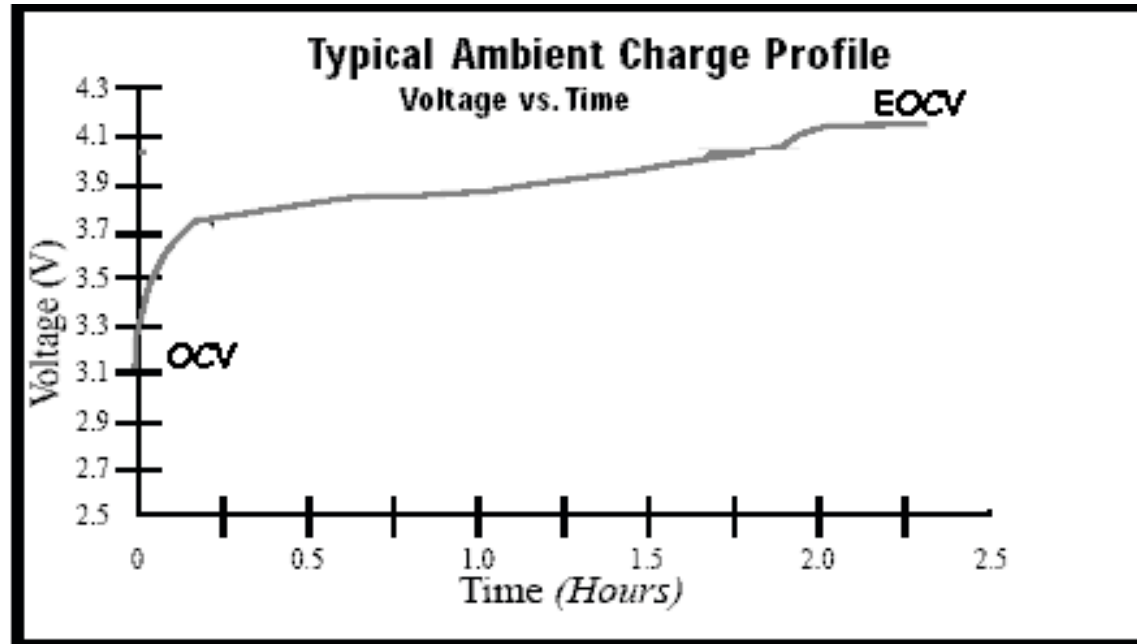
La capacità nominale rappresenta l'ammontare dell' energia immagazzinata all'interno della cella ad inizio vita (BOL) e può essere espressa in termini di Ah o di Wh.

### □ **EOCV (End OF Charge Voltage) = TENSIONE DI FINE CARICA**

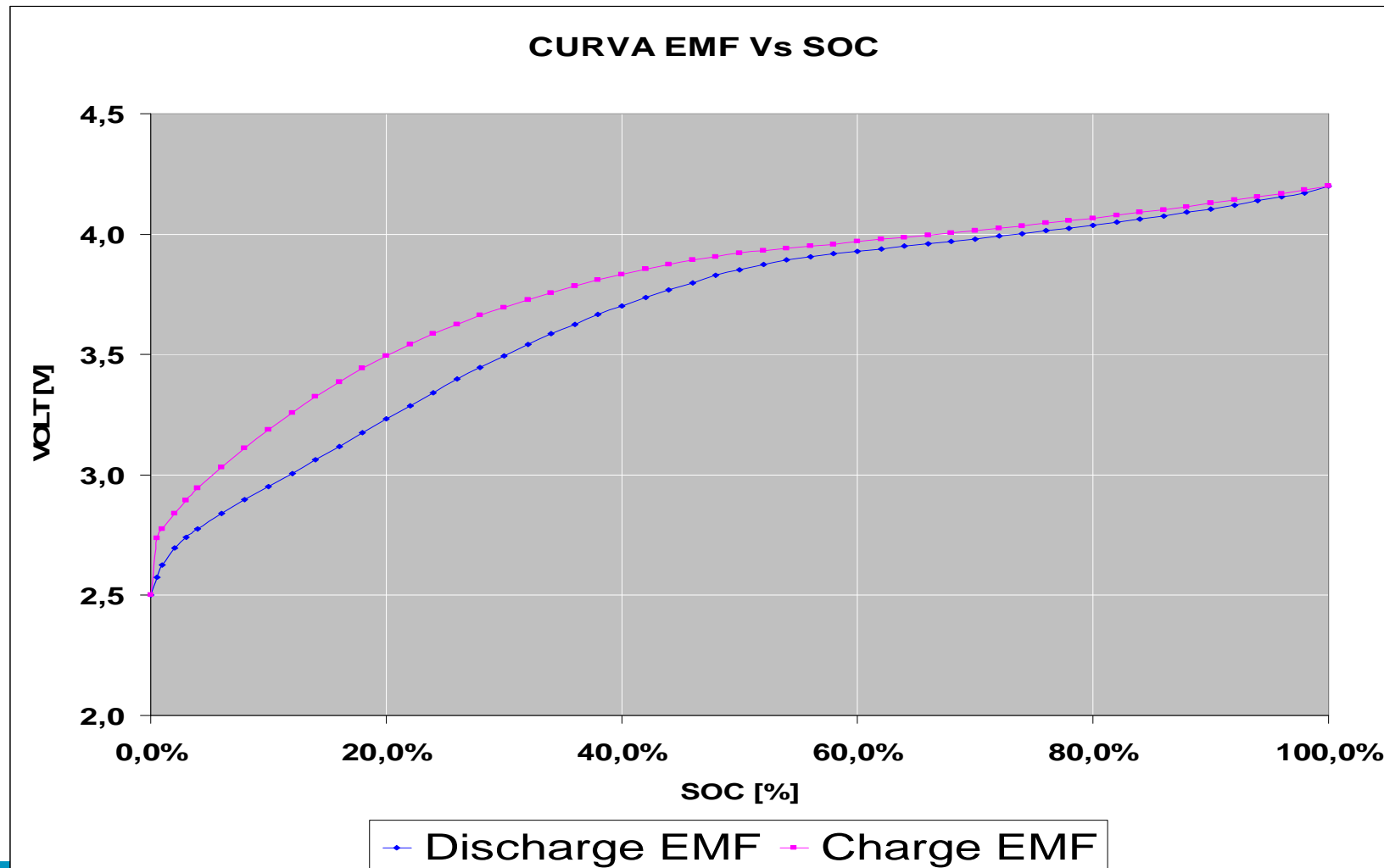
La tensione di fine carica indica il valore di tensione in corrispondenza del quale la cella ha raggiunto il 100% della sua carica. Rappresenta quindi il massimo valore che la tensione può raggiungere senza che la cella venga danneggiata.

### □ **OCV (Open Circuite Voltage) = TENSIONE A CIRCUITO APERTO**

La tensione a circuito aperto indica il valore di tensione in corrispondenza del quale la cella ha raggiunto lo 0% della sua carica. Rappresenta quindi il minimo valore che la tensione di una cella può raggiungere durante una scarica.



- ❑ **EMF (ElectroMotiv Force) = FORZE ELETTRICITÀ**  
La forza elettromotrice rappresenta la tensione ai capi della cella a meno della caduta di tensione dovuta alla sua resistenza interna.
  
- ❑ **SOC (State of Charge) = STATO DI CARICA**  
Lo stato di carica della cella rappresenta l'ammontare della capacità immagazzinata all'interno della batteria nell'istante considerato e viene espressa in termini percentuali rispetto alla capacità nominale della stessa.
  
- ❑ **DoD (Depth of Discharge) = PROFONDITA' DI SCARICA**  
La profondità di scarica rappresenta la percentuale della capacità della cella che viene erogata durante una scarica e viene espressa in termini percentuali rispetto alla capacità nominale.



### □ FADE

Il fade rappresenta la percentuale della capacità della cella che viene persa durante la vita e viene espressa in termini percentuali rispetto alla capacità nominale.

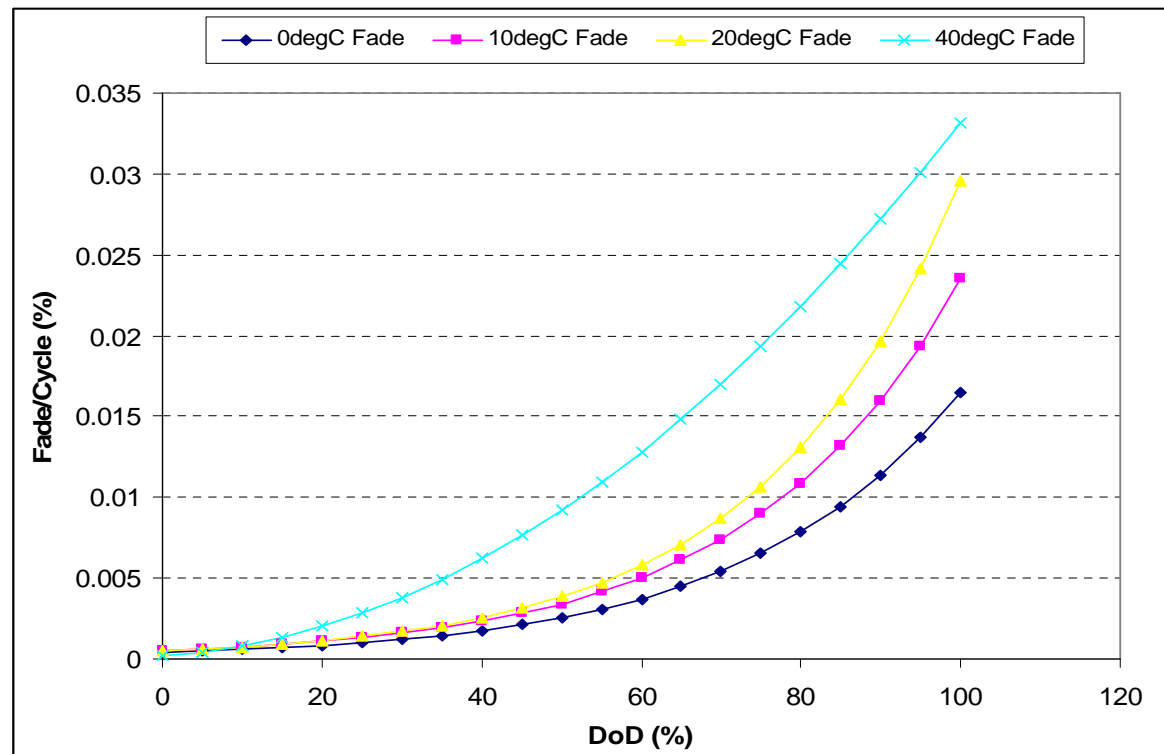
Il fade della batteria è dato dalla somma di due contributi:

1. **CALENDAR**: rappresenta la degradazione legata unicamente al tempo trascorso
2. **CYCLING** : rappresenta la degradazione legata al numero di cicli di carica/scarica che ha effettuato nell'arco della vita.

Il fade è funzione dei seguenti parametri:

- DOD
- TEMPERATURA OPERATIVA
- EOCV
- CICLI di CARICA/SCARICA

## FADE versus DOD e T per un ciclo carica/scarica



Le batterie primarie:

- ❑ convertono energia chimica in energia elettrica ma non possono invertire questa conversione
- ❑ non possono essere ricaricate
- ❑ vengono utilizzate per missioni molto brevi (meno di un giorno)

La principale tipologia utilizzata è la AgZn che è caratterizzata da una densità energetica che varia nel range 60-130 Wh/kg.

### Le batterie secondarie:

- ❑ convertono energia chimica in energia elettrica durante la scarica ed energia elettrica in energia chimica durante la carica
- ❑ possono essere ricaricate
- ❑ possono ripetere il ciclo carica/scarica per diverse migliaia di volte
- ❑ vengono utilizzate per missioni lunghe (fino a 15 anni)

Le tecnologie maggiormente utilizzate fino ad una decina di anni fa in campo spaziale erano:

- Ni-CD
- NiH<sub>2</sub>.

La richiesta sempre più pressante di batterie più leggere, meno ingombranti e con elevati valori di potenza disponibili ha spinto all'uso del litio nella costruzione degli elettrodi delle batterie.

	Densità Energetica (Wh/kg)
Ni-Cd	25-30
Ni-H2	25-60
LI-ION	90-130



## METODO AMPEROMETRICO

L'energia scaricata  $C_{disch}$  (Ah) viene rimpiazzata caricando la batteria a corrente costante  $I_{ch}$  (A) e per un intervallo di tempo  $T_{ch}$  (h) tale che:

$$T_{ch} = C_{disch} / I_{ch}$$

Tale tempo viene incrementato del cosiddetto fattore  $K$ , per tener conto dell'inefficienza della ricarica; varia da BOL a EOL (aumenta) per tener conto della degradazione di performances della batteria.

Tale metodo presuppone il calcolo (a terra oppure a bordo) di  $C_{disch}$ .

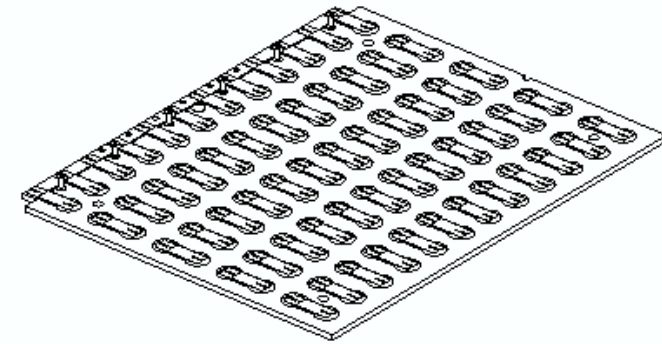
Le batterie agli Ioni di Litio sono state introdotte nel campo aerospaziale perché, avendo una densità energetica in termini di massa molto superiore rispetto a quella delle batterie NiH<sub>2</sub>, permettono un considerevole risparmio in termini di massa.

Attualmente le case che producono celle utilizzate nel campo aereospaziale sono:

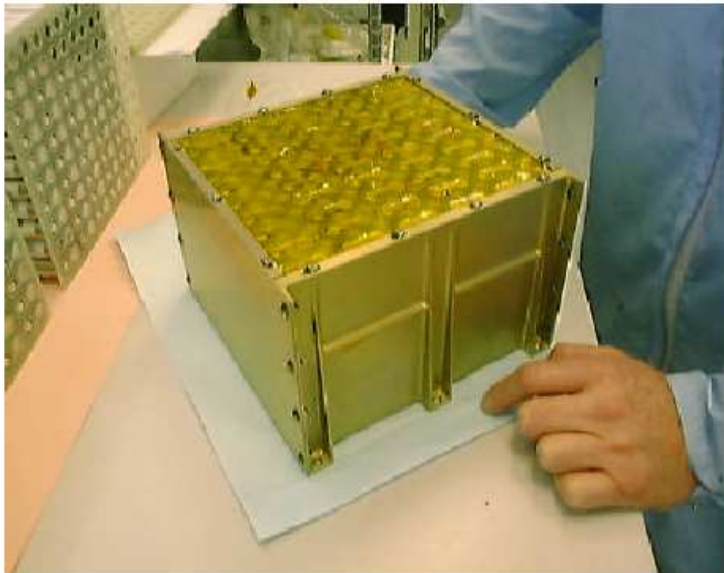
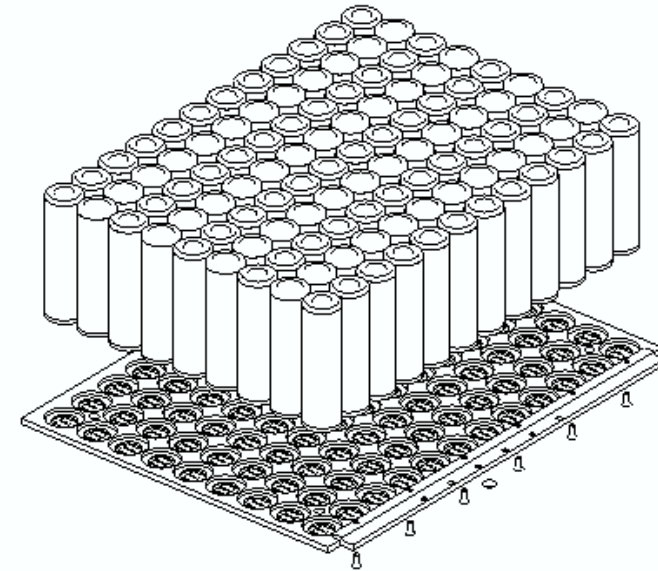
- SONY
- SAFT
- MELCO



**SONY CELL**  
Capacità: 1,5 Ah  
Diametro: 18 mm  
Altezza: 6.3 cm  
Massa: 40 g



UN "TRAY" IN  
CONFIGURAZIONE  
9S-12P



UN MODULO  
ASSEMBLATO

**VES100**

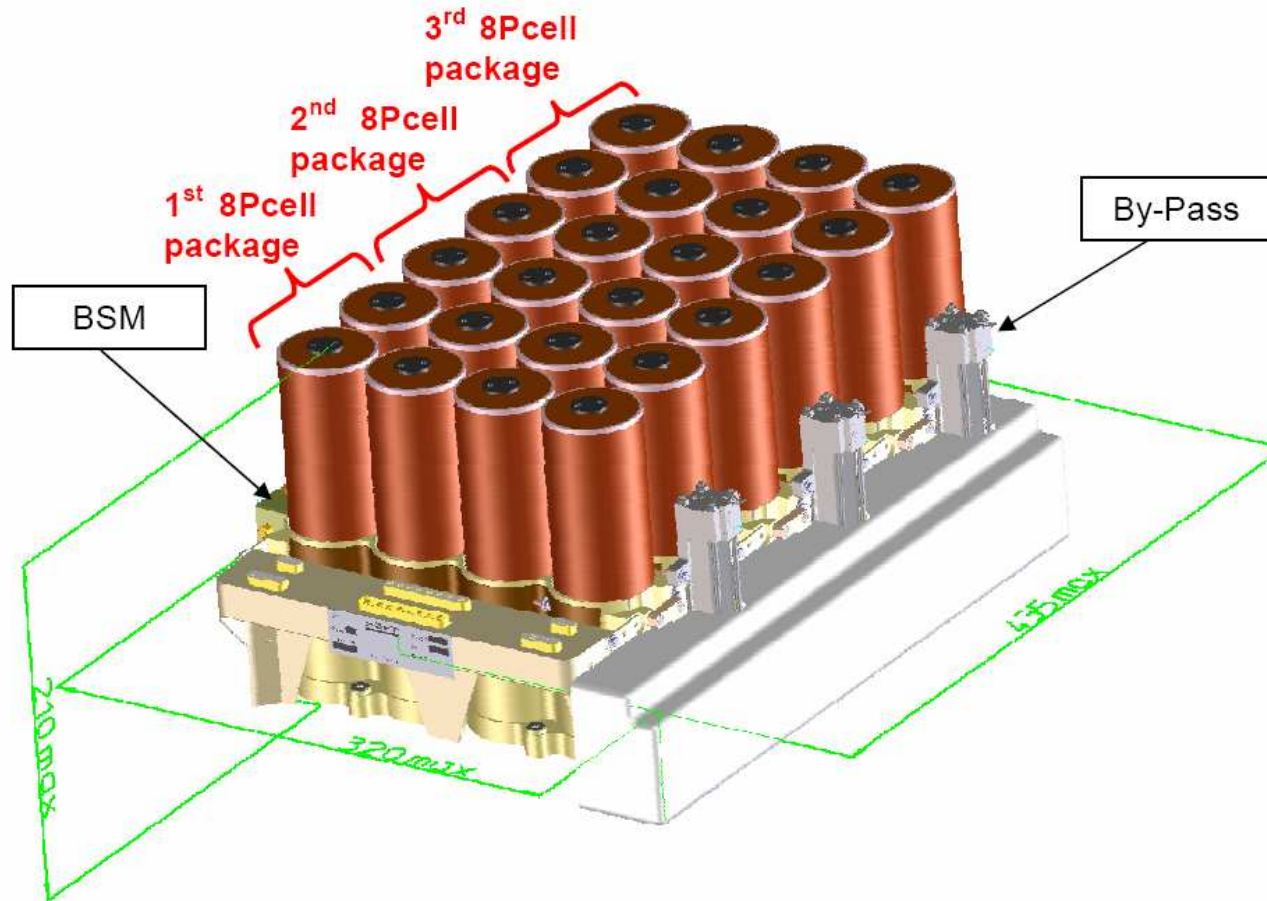


**VES100**  
Capacità: 26Ah  
Diametro: 53 mm  
Altezza: 185 mm  
Massa: 810 g

**VES140**



**VES140**  
Capacità: 39Ah  
Diametro: 53 mm  
Altezza: 250 mm  
Massa : 1.13 kg

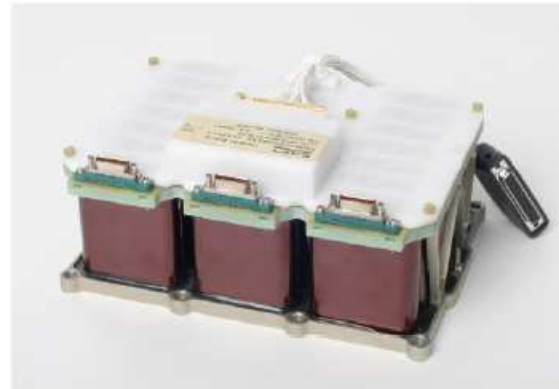


● **8S3P MP 176065**



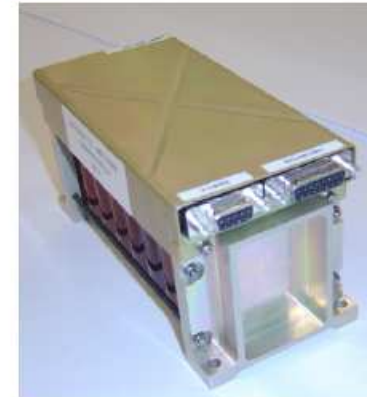
**Energy BOL:** 480 Wh  
**Configuration:** 8S x 3P  
**Weight:** 4600 g  
**Width:** 220 mm  
**Length:** 170 mm  
**Height:** 95 mm

● **7S3P MP 176065**

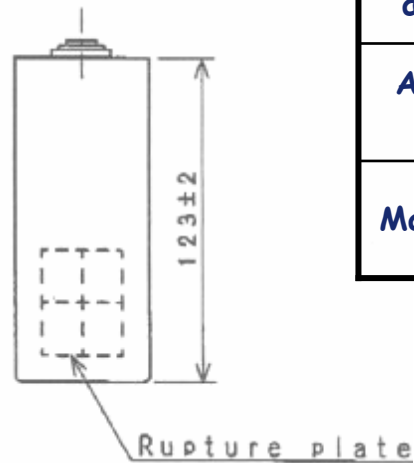
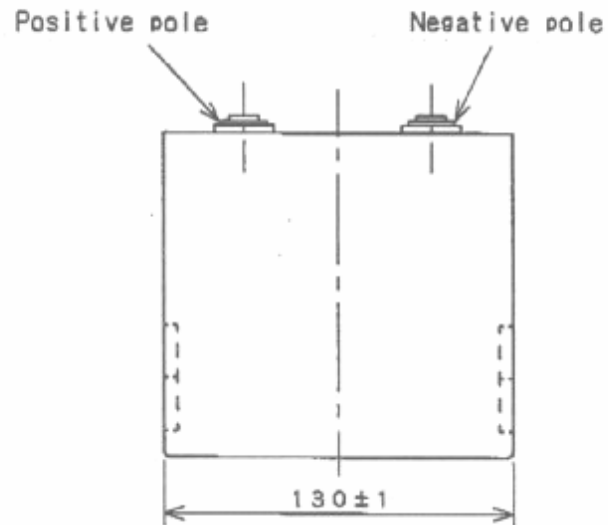
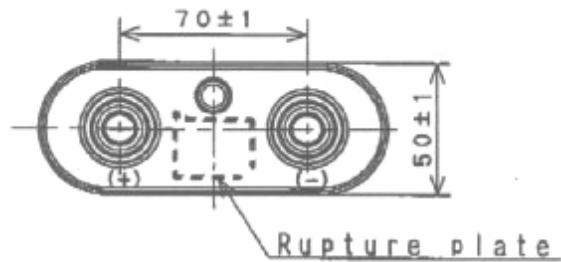


**Energy BOL:** 420 Wh  
**Configuration:** 7S x 3P  
**Weight:** <4400 g  
**Width:** 218 mm  
**Length:** 160 mm  
**Height:** 95 mm

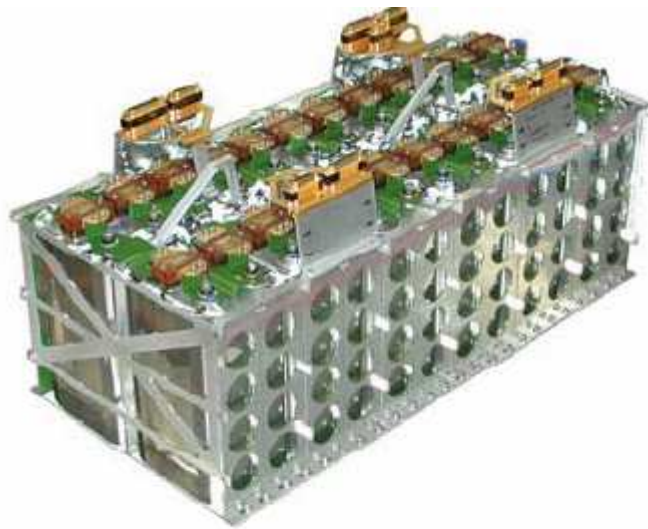
● **7S MP 176065**



**Energy BOL:** 140 Wh  
**Configuration:** 7S 1P  
**Weight:** < 1600g  
**Width:** 168 mm  
**Length:** 77 mm  
**Height:** 95 mm



	LM50	LM100	LM175
Capacità (Ah)	50	100	175
Larghezza (mm)	50	50	50
Lunghezza (mm)	130	130	165
Altezza (mm)	123	208	265
Massa (g)	1500	2800	4700



**100Ah, 24 Li-Ion cells Battery**

### Battery Characteristics

Capacity : 3600(WHr)

Voltage : 33-40(V)

Cell Capacity : 100(Ah)

Quantity of Cells : 10 cells in series

Width : 328 mm

Length : 352

Height : 274.5

Mass : 35.9 kg

Specific Energy : 100.3 WHr/kg

Le principali problematiche gestionali che vengono affrontate nella progettazione di una batteria agli Ioni di Litio sono quelle di seguito riportate :

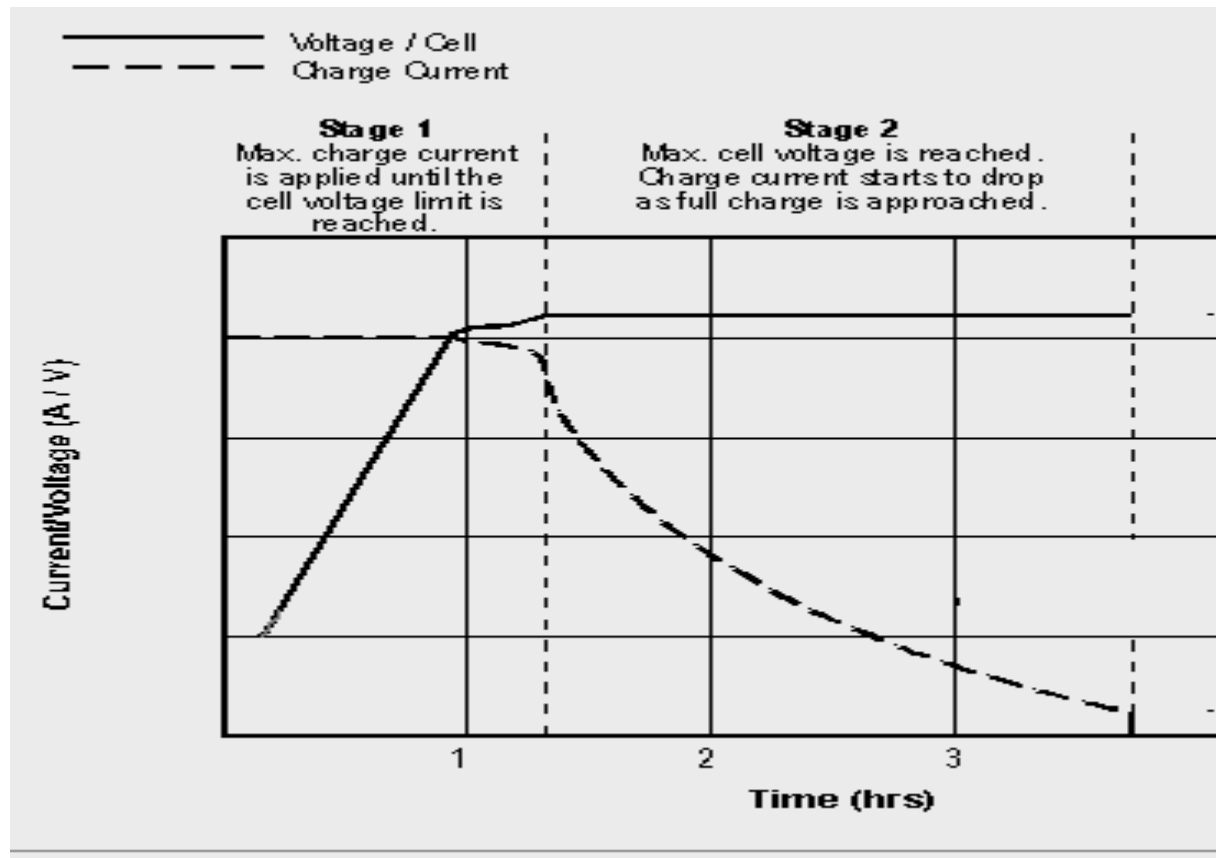
- METODO di RICARICA
- BILANCIAMENTO
- GESTIONE delle FAILURES
- PROTEZIONI della BATTERIA.

### METODO CC-CV

Le batterie agli Ioni di Litio devono essere ricaricate con il METODO CC-CV.

Il termine *CC-CV* sta per *Constant Current-Costant Voltage* ed indica un metodo di ricarica che prevede due fasi ben distinte tra loro:

- *FASE a Constant Current*: la batteria viene caricata a corrente costante fino a quando non raggiunge il valore di *EOCV*
- *FASE a Constant Voltage*: la batteria viene caricata a tensione costante fino a quando la corrente di carica non diventa prossima allo zero.



I valori di tensione e corrente caratteristici del metodo *CC-CV* variano a seconda della tecnologia con cui sono costruite le celle .

Per le celle agli Ioni di litio considerate sono ammessi i seguenti valori massimi:

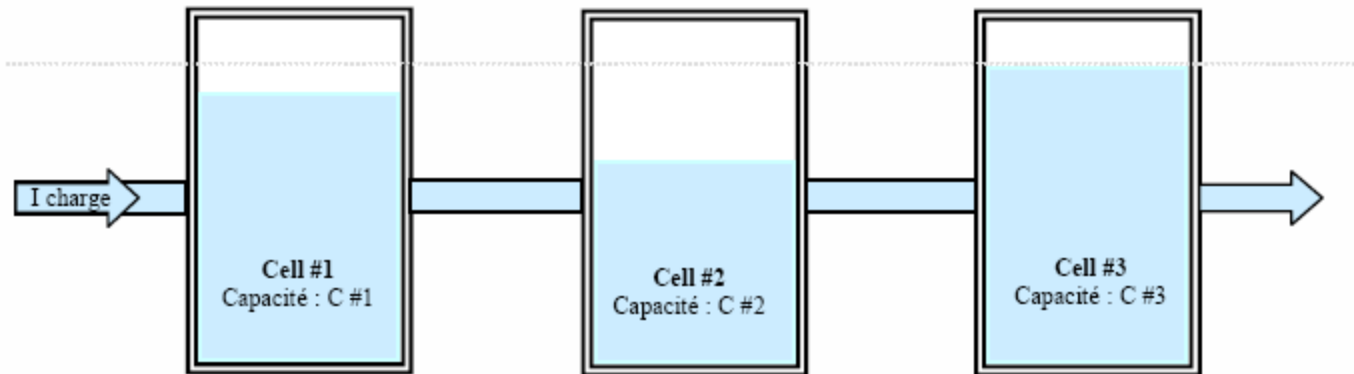
	<b>SONY</b>	<b>SAFT</b>	<b>MELCO</b>
<b>MAX CORRENTE DI CARICA</b>	<b>C</b>	<b>C/4</b>	<b>C/4</b>
<b>MAX EOCV</b>	<b>4.2 V</b>	<b>4 V</b>	<b>4 V</b>

Le celle agli ioni di Litio sono soggette ad un'auto-scarica che varia da cella a cella.

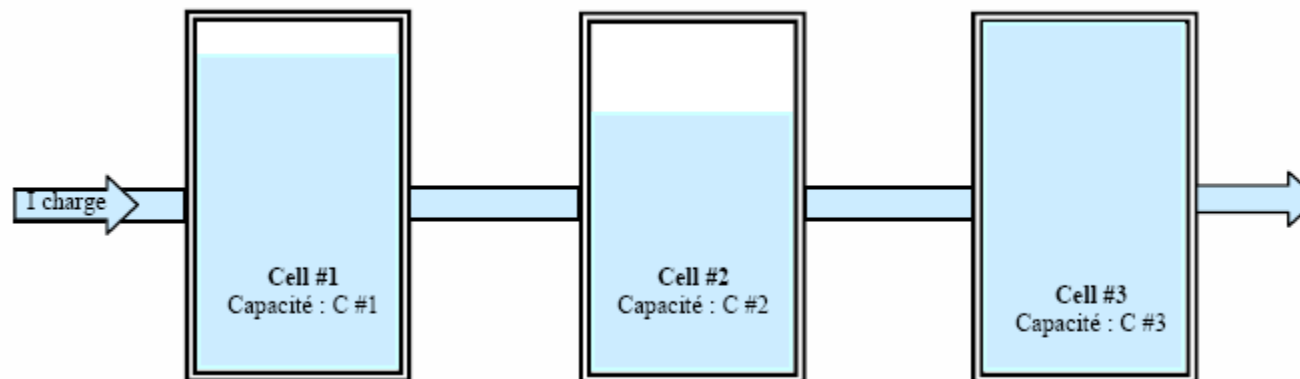
Questa non omogeneità provoca all'interno della generica batteria uno sbilanciamento della tensione tra le varie celle.

Questo fenomeno insieme al limite imposto dalla carica sulla EOCV porta nel tempo ad una perdita della capacità totale della batteria

## STATO DELLE CELLE AD INIZIO CARICA



## STATO DELLE CELLE A FINE CARICA



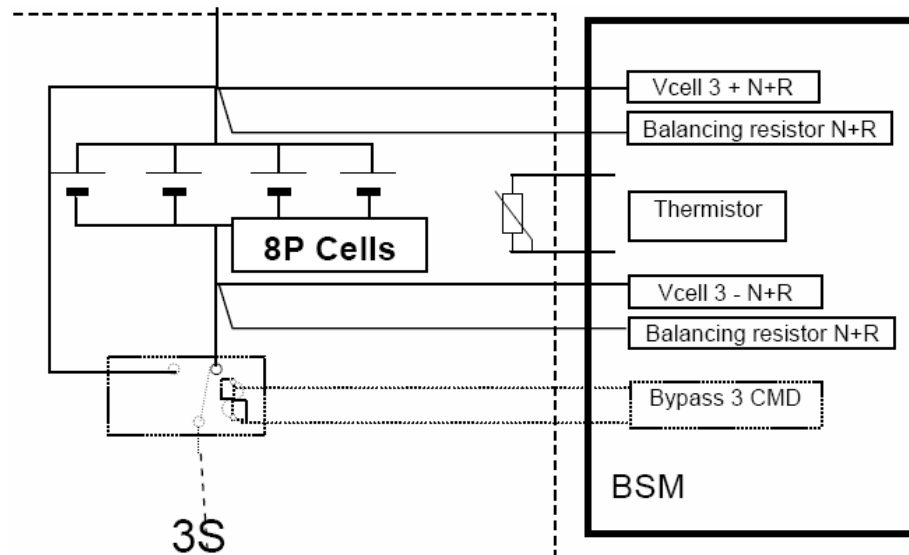
Anche se il fenomeno dell'auto-scarica è valido qualunque sia la cella Li-Ion considerata, lo sbilanciamento che ne deriva può essere trascurato per le celle prodotte dalla SONY.

I motivi di questa differenza sono molteplici:

- Le correnti di auto-scarica sono proporzionali alla capacità della cella
- la non omogeneità delle correnti di auto-scarica è tanto maggiore quanto maggiore è la capacità della cella
- le SONY sono celle commerciale e sono quindi caratterizzate da una catena di produzione soggetta a stretti controlli.

Per evitare la perdita della capacità della batteria le celle devono essere bilanciate.

Per questa ragione a terra come a bordo normalmente viene effettuata un'attività di ricondizionamento delle batterie, che consiste in una scarica completa su dei carichi resistivi opportunamente predisposti a bordo.



## Principio di Bilanciamento per le celle SAFT

1. Leggi  $V_p$
2. Se  $V_p > V_t + \Delta V \rightarrow$  Chiudi il Relè di pacco
3. Se  $t > c^* (V_p - V_t - \Delta V) \rightarrow$  Apri il Relè di pacco

$V_p$  = tensione del generico pacco di celle

$V_t$  = valore fissato dal fornitore

$c$  = costante

$\Delta V$  = valore compreso tra 50 mV-100mV

Tipicamente il progetto spaziale di una batteria deve essere "SINGLE FAILURE TOLERANT".

Una failure può essere dovuta a diverse ragioni:

1.OPEN CIRCUIT

2.SHORT CIRCUIT

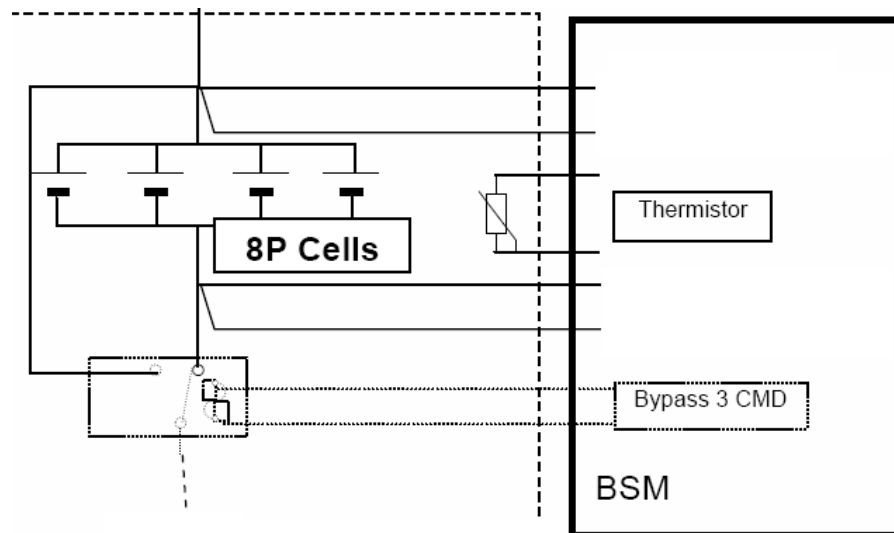
Il “fallimento” di una cella ha conseguenze completamente diverse a seconda della tipologia di cella che consideriamo e questo dipende dalla configurazione della batteria:

- SONY: la perdita di una cella implica la perdita di una stringa → 1.5 Ah
- SAFT/MELCO: la perdita di una cella comporta la perdita di una cella della serie → 100 Wh-180 Wh

Il requisito di essere "SINGLE FAILURE TOLERANT" viene gestito in modo diverso nei due casi:

- **SONY:** la batteria viene progettata aggiungendo una stringa alla configurazione di BTA necessaria a soddisfare i requisiti di missione
- **SAFT:** la batteria è dotata di un'elettronica in grado di escludere la cella fallita dalla batteria.

Tutti i pacchi che costituiscono la batteria SAFT/MELCO sono dotati di un BYPASS per ognuna delle celle che costituiscono il pacco che permette di disconnettere la cella stessa dal circuito della batteria.



## Principi di gestione della FAILURE per le celle SAFT

1. Leggi  $V_c$

2. Se

$$V_c > V_{max} \quad \text{oppure} \quad V_c < V_{min}$$

manda un comando per armare Relè di pacco e spara il pirotecnico.

$V_c$  = tensione della generica cella del pacco

$V_{max}$  = tensione massima ammessa dalla generica cella (4.3V )

$V_{min}$  = tensione minima ammessa dalla generica cella (1.5 V )

La missione condiziona fortemente il progetto del sottosistema di potenza elettrica del satellite e in particolar modo della batteria che è una delle unità più fortemente influenzate dai fattori orbitali.

Partendo dalle esigenze del cliente viene progettata la MISSIONE generando una serie di OUTPUTS, alcuni dei quali diventano INPUTS per il progetto della batteria.

- VISIBILITA' DEL SATELLITE
- CONDIZIONE D' ILLUMINAZIONE DEL SATELLITE
- SCENARI OPERATIVI
- LIFETIME

- **VISIBILITA' DEL SATELLITE:** La frazione di tempo in cui il satellite è illuminato dal sole o è in eclisse (Periodi di ECLISSE e SUNLIGHT)
- **CONDIZIONE D' ILLUMINAZIONE DEL SATELLITE:** L'angolo che il vettore sole forma con i pannelli solari quando il satellite è illuminato dal sole (angolo BETA)

Il tipo di orbita è l'unico fattore responsabile della determinazione dei periodo di ECLISSE e SUNLIGHT, mentre ad influenzare l'angolo BETA concorre anche la configurazione di satellite e in particolare il montaggio del pannello solare.

**SCENARI OPERATIVI:** Le performances richieste al satellite durante la sua vita operativa.

Gli scenari operativi possono essere profondamente diversi a seconda delle richieste più o meno stringenti del cliente e del tipo di payload montato a bordo.

**LIFETIME:** Vita del satellite ovvero la somma del numero di anni da passare in condizioni di storage e in orbita.

Orbit	OP 1	OP 2	OP 3	OP 4	OP 8	OP 9	OP 10
i	5 SP	5 SP	0	0	5 SP + 25 HI	5 SP + 25 HI	0
i+1	10 SP	10 SP	10 SP	0	5 SP + 25 HI	5 SP + 25 HI	10 SP
i+2	10 SP	10 SP	10 SP	10 SP	5 SP + 25 HI	5 SP + 25 HI	10 SP
i+3	10 SP	10 SP	10 SP	15 SP	5 SP + 25 HI	15 SP	10 SP
i+4	10 SP	10 SP	15 SP	15 SP	5 SP + 25 HI	15 SP	15 SP
i+5	10 SP	10 SP	15 SP	15 SP	5 SP + 25 HI	15 SP	15 SP
i+6	20 SP	10 SP	15 SP	20 SP	5 SP + 25 HI	10min HI	15 SP
i+7	5 min HI	10 SP	10min HI	5 min HI	5 SP + 25 HI	5 SP + 25 HI	10min HI
i+8	5 min HI	10min HI	5 min HI	5 min HI	5 SP + 25 HI	5 SP + 25 HI	50 HI
i+9	5 min HI	5 min HI	5 min HI	5 min HI	5 SP + 25 HI	5 SP + 25 HI	50 HI
i+10	5 min HI	5 min HI	5 min HI	5 min HI	5 SP + 25 HI	25 HI	50 HI
i+11	5 min HI	5 min HI	5 min HI	5 min HI	5 SP + 25 HI	25 HI	50 HI
i+12	5 min HI	5 min HI	5 min HI	5 min HI	5 SP + 25 HI	25 HI	50 HI
i+13	5 min HI	5 min HI	2.5 min HI	5 min HI	5 SP + 25 HI	25 HI	25 HI
i+14	2.5 min HI	2.5 min HI	0	2.5 min HI	5 SP + 25 HI	25 HI	0
TOT	75 SP + 37.5 min HI	75 SP + 37.5 min HI	75 SP + 37.5 min HI	75 SP + 37.5 min HI	75 SP + 375 HI	75 SP + 10 min HI + 275 HI	75 SP + 10 min HI + 275 HI

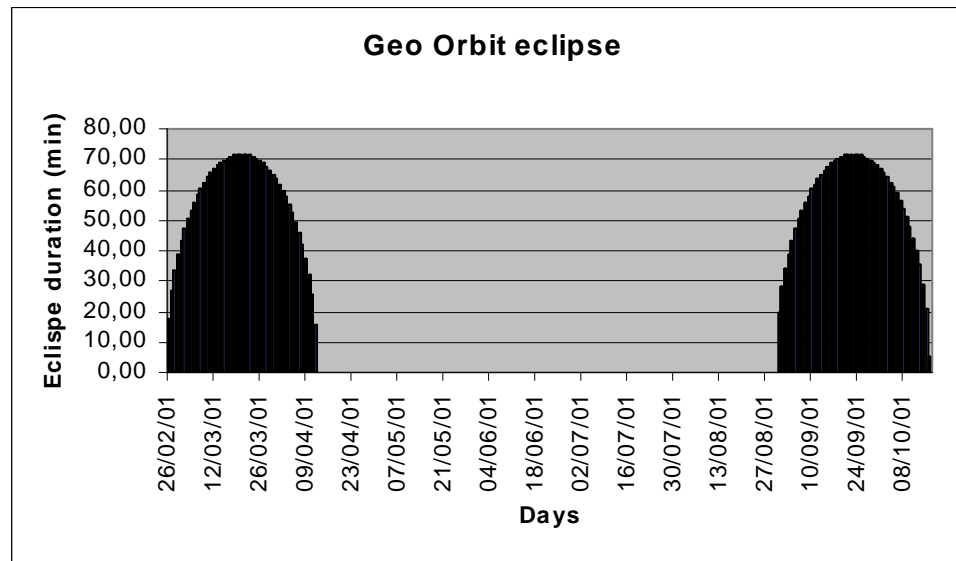
I parametri della batteria che sono influenzati dalla missione e concorrono al suo dimensionamento sono i seguenti:

- DOD (ECLISSE + illuminazione + scenari operativi)
- CICLATURA (scenari operativi)
- FADE (LIFETIME + DOD + ciclatura)

Considereremo due tipologie di missione:

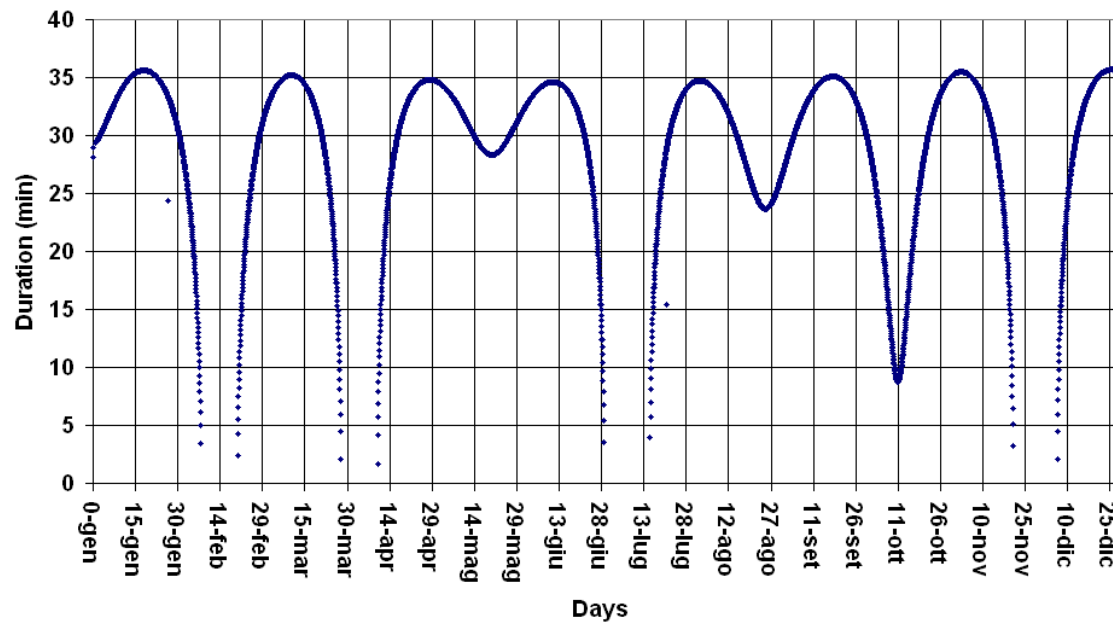
- ❑ SATELLITE DI TELECOMUNICAZIONE  
ORBITA GEO (Geosynchronous Earth Orbit)
  
- ❑ SATELLITE DI TELERILEVAMENTO  
ORBITA LEO (Low Earth Orbit)

Un satellite in orbita GEO si trova raramente nel cono d'ombra della terra, pertanto le stagioni di eclisse si verificano solo due volte all'anno ed ognuna ha una durata di circa 45 giorni. In tali periodi vi è un'eclissi al giorno con una durata variabile (la massima è di circa 72 minuti).



Un satellite in orbita LEO si trova molto più frequentemente nel cono d'ombra della terra, pertanto le stagioni di eclisse si verificano per circa 9 mesi all'anno ed ognuna ha una durata di circa 45 giorni. In tali periodi vi è un'eclissi al giorno con una durata variabile (la massima è di circa 35 minuti).

Umbra/penumbra for LEO satellite



	<b>SATELLITE GEO</b>	<b>SATELLITE LEO</b>
<b>DOD</b>	<b>75 %</b>	<b>35 %</b>
<b>Cycling</b>	<b>50 cicli/anno</b>	<b>5500 cicli/anno</b>

Dimensionare l'unità batterie significa identificare la minima batteria in grado di soddisfare gli scenari operativi identificati dalla missione per l'intera vita operativa del satellite garantendo il rispetto dei requisiti imposti dall'architettura del sottosistema di potenza elettrica.

## INPUT

- VITA OPERATIVA
- RANGE DI TENSIONE DEL BUS DI POTENZA
- PROFILI DI POTENZA

## OUTPUTS

- CONFIGURAZIONE
- CAPACITA'
- MASSA
- TEMPERATURA OPERATIVA.

Il dimensionamento di un pacco batteria può essere effettuato seguendo i seguenti STEPS:

1. Determinare  $N_s$  (numero delle celle in serie)
2. Individuare la richiesta energetica della missione
3. Individuare la ciclatura richiesta dalla missione
4. Determinare il fade della BTA
5. Determinare  $N_p$  (numero delle stringhe in parallelo)

Dalla definizione dell'architettura del sottosistema di Potenza Elettrica vengono identificati i seguenti INPUTS:

- il tipo di bus (regolato o non regolato) del satellite
- il range di tensioni ammissibili [V\_BUS\_MIN ; V\_BUS\_MAX].

che servono per determinare il numero di celle Ns da connettere in serie per costituire una stringa della batteria.

$$N_s = V\_BUS\_MAX / V\_CELL\_MAX$$

**Ns = Celle di una stringa**  
**V\_CELL\_MAX = EOCV**

Esistono una serie di parametri di seguito riportati che devono essere ricavati a partire dai profili di missione:

1.  $E\_DISCH\_MAX$ , il picco energetico estrapolato dai profili di missione
2. Numero di cicli richiesti alla batteria nell'intera vita del satellite

Un altro parametro importante da valutare per poter effettuare il dimensionamento è l'invecchiamento della batteria. Bisogna quindi valutare l'entità del FADE.

A partire dal grafico FADE versus DOD e T caratteristico della cella considerata si può determinare il Fade per un ciclo carica/scarica, considerando che:

- DOD pari a 75% per GEO 35 % per LEO
- T media di 20°C

I valori di Fade tipici che vengono fuori adottando l'approccio descritto possono essere compresi nel range 15%÷30%.

Per determinare il numero di stringhe che devono essere connesse in parallelo è necessario conoscere l'energia totale che la batteria deve possedere alla fine della sua vita operativa.

$$E_{BTA} = E_{DISCH\_MAX} / DOD\_MAX * (1 + FADE)$$

$E_{DISCH\_MAX}$  = picco energetico estrapolato dai profili di missione

$DOD\_MAX$  = 75 % per GEO e 35 % per LEO

$$N = E_{BTA}/E_{CEL}$$

$$N_p = N/N_s + 1$$

$E_{BTA}$  = Energia stimata della batteria

$E_{CEL}$  = Energia della cella

$N$  = Numero totale di celle della batteria

La batteria avrà una configurazione  $N_s-N_p$ .

Parametro	Requirement
V_BUS_MAX	38 V
V_BUS_MIN	26 V
ORBITA	LEO
LIFETIME	5 ANNI



$$N_s = 38 / 4.2 = 9$$

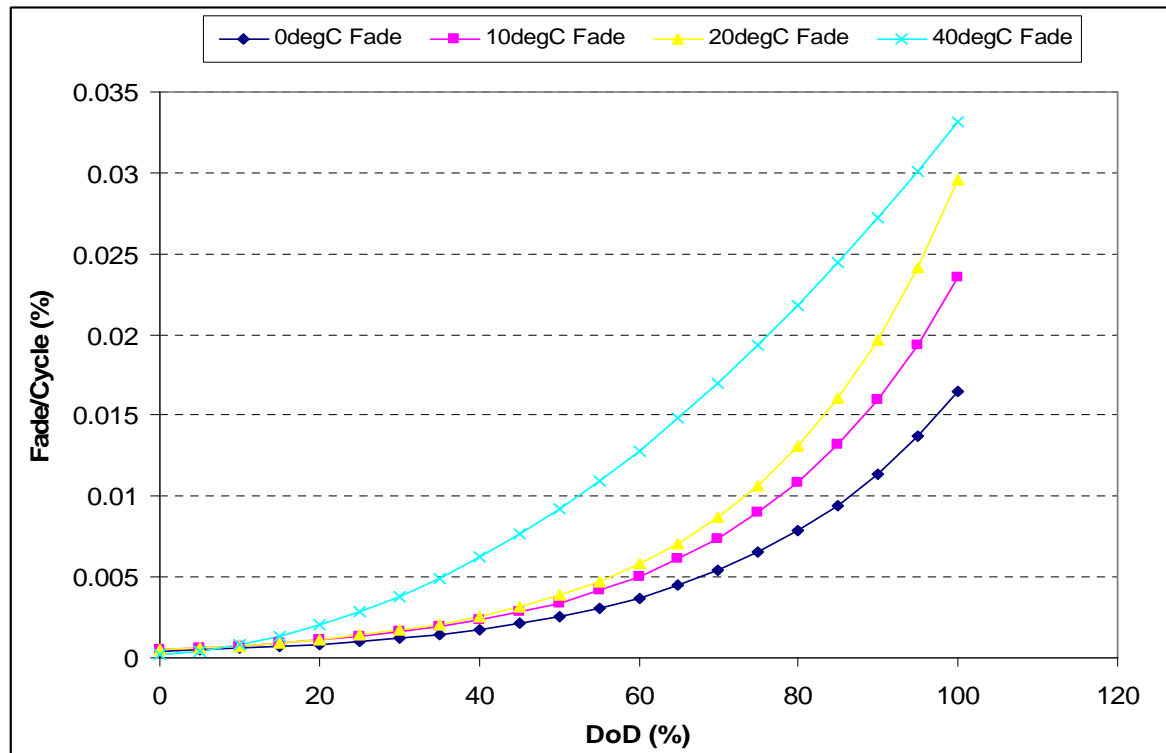


$$CICLI = 15 * 365 * 5 = 27375$$

<b>BTA POWER PROFILE ( ECLIPSE SEASON)</b>				
<b>FROM (h.mm.ss)</b>	<b>TO (h.mm.ss)</b>	<b>BTA POWER (W)</b>	<b>BTA OPERATIVE MODE</b>	<b>SEASON</b>
<b>0.00.00</b>	<b>0.19.00</b>	<b>PS/C = 5720</b>	<b>DISCHARGE</b>	<b>ECLIPSE</b>
<b>0.19.00</b>	<b>0.25.00</b>	<b>PS/C = 5720</b>	<b>DISCHARGE</b>	<b>SUNLIGHT</b>
<b>0.25.00</b>	<b>1.39.00</b>	<b>PS/C = 2540</b>	<b>CHARGE</b>	<b>SUNLIGHT</b>

$$E\_DISCH\_MAX = 5720 * 25 / 60 = 2383 \text{ Wh}$$

## FADE versus DOD e T per un ciclo carica/scarica



$$\text{FADE} = 0.001 * 27375 = 27 \%$$

$$E_{BTA} = 2383 / 0.35 * (1 + 0.27) = 8647 \text{ Wh}$$

$$N = 8647/6.3 = 1373$$

$$N_p = 1373/9 + 1 = 154$$

Quando si parla di "PROCUREMENT" di un'unità ci si riferisce a tutta quella serie di attività che concorrono all'acquisto dell'unità stessa.

Queste attività coprono essenzialmente tre aspetti fondamentali:

1. **GESTIONE**
2. **QUALITÀ**
3. **TECNICI**

Lo strumento fondamentale per gestire una fornitura dal punto di vista tecnico è la "SPECIFICA" della fornitura stessa.

La SPECIFICA è un documento che racchiude tutti i requisiti che l'unità da acquistare deve rispettare e le modalità con cui tale requisiti verranno verificati a fine progetto.

I requisiti devono essere scritti nel modo più semplice possibile e non devono essere ambigui.

## ESEMPIO di REQUISITO

### **#XX-BTA-REQ-000191 Minimum Battery Voltage**

**Verification: [A]**

**The minimum value of Battery Voltage at S/C interface bracket shall be higher than 52 (TBC) V (including one failure) in any operational conditions during the whole Mission Lifetime (12.25 years).**