

## Subsistema de Suprimento de Energia

---

Petrônio Noronha de Souza

**Coordenação Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial – ETE  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
São José dos Campos, SP  
Novembro de 2002**

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia (\*)

- **Objetivos:**

- Geração de energia elétrica (geralmente através de painéis solares).
- Armazenamento de energia (geralmente em baterias).
- Condicionamento, conversão e regulação de potência.
- Distribuição da potência aos diversos subsistemas e equipamentos.

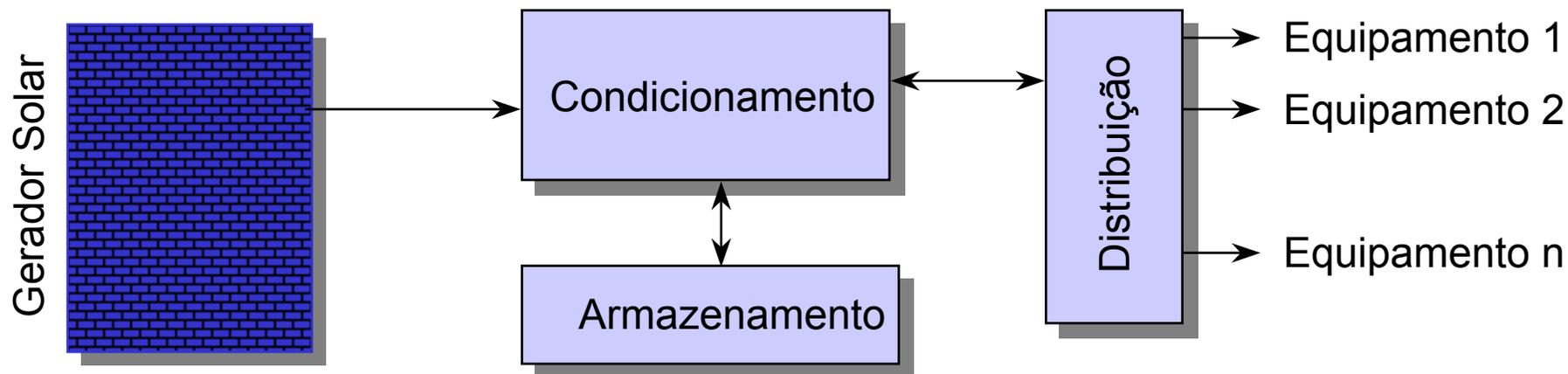


Fig.: Diagrama de blocos de um Subsistema de Suprimento de Energia típico.

- Os Subsistemas de Suprimento de Energia são usualmente classificados em **Estáticos** (sem partes móveis) e **Dinâmicos** (com partes móveis).

# 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia, [3]

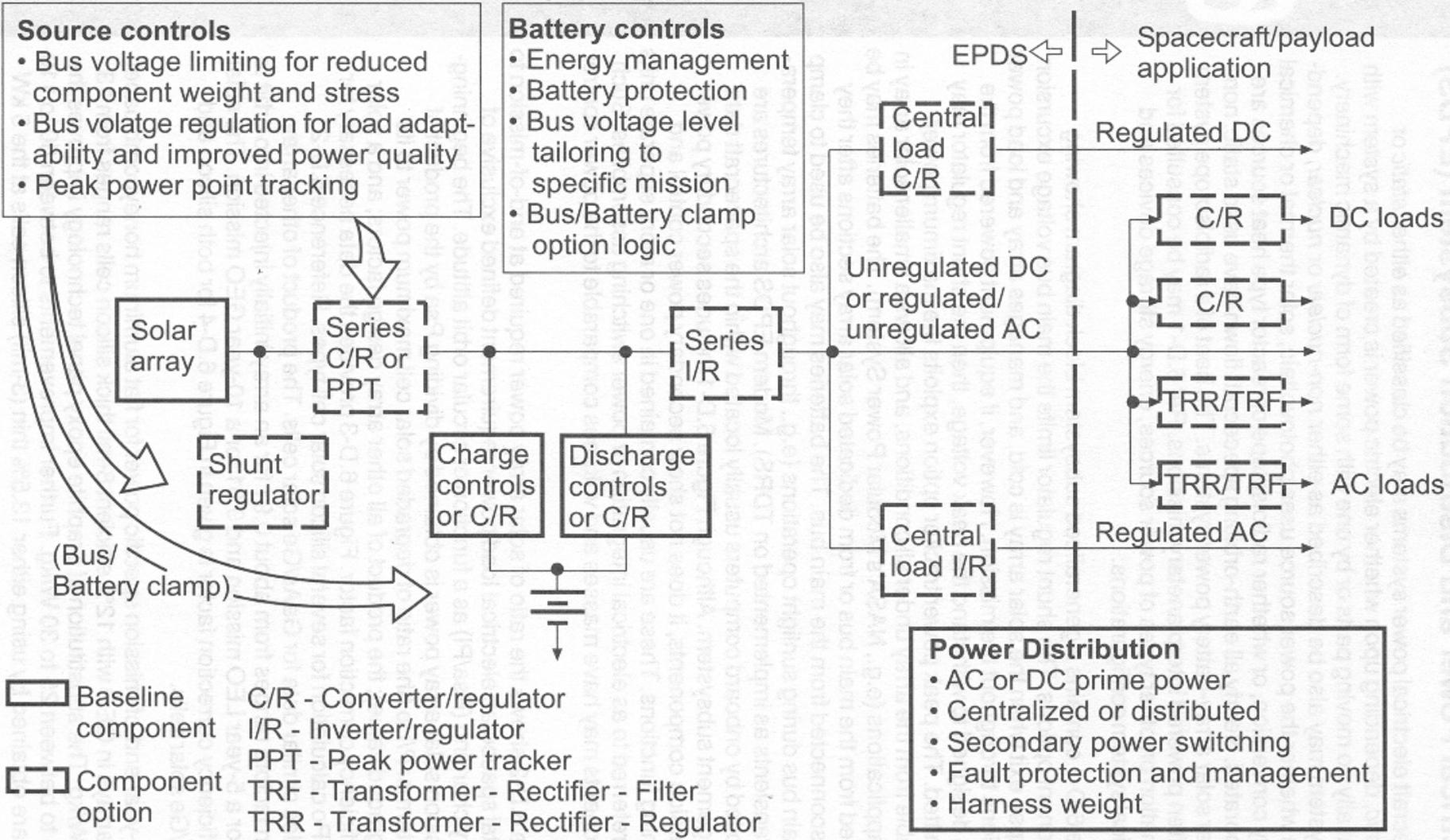


Fig.: Diagrama de blocos de um Subsistema de Suprimento de Energia.

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Alternativas para a geração

---

- Características esperadas:
  - **Segurança** (para o pessoal e outros equipamentos).
  - **Alta densidade de potência** (baixo peso e volume reduzido).
  - **Compatibilidade com a espaçonave e sua missão.**
  - **Disponibilidade no mercado a prazo razoável.**
  - **Baixo custo.**
- Principais tipos disponíveis:
  - **Baterias primárias:** São lançadas carregadas e não aceitam recarga. São utilizadas para missões de curta duração, ou para executar tarefas específicas no início da vida da espaçonave.
  - **Baterias secundárias:** Constituem a bancada de baterias recarregáveis que normalmente equipam os satélites. São a fonte de energia nas fases de eclipse e início da vida dos satélites.
  - **Dinâmico químico:** Sistema que aciona um gerador a partir de um combustível (semelhante a uma unidade auxiliar de potência – APU).
  - **Células de combustível tradicionais:** São semelhantes às baterias primárias com a diferença que a energia está armazenada em um combustível que a alimenta. Ela fornece energia enquanto houver combustível.
  - **Células de combustível avançadas:** Diferem das células tradicionais por serem regenerativas.
  - **Nucleares:** Utiliza uma reação de fissão nuclear para gerar calor. O calor é depois aproveitado por um gerador **Termoelétrico**, **Termiônico** ou **Dinâmico** para gerar energia elétrica.

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Alternativas para a geração (cont.)

- Principais tipos disponíveis: (cont.)
  - **Dinâmico Solar:** Sistema que aciona um gerador a partir do calor solar.
  - **Fotovoltaico Solar:** Produz corrente elétrica a partir da incidência de luz e radiação sobre uma junção de materiais semicondutores (células solares).

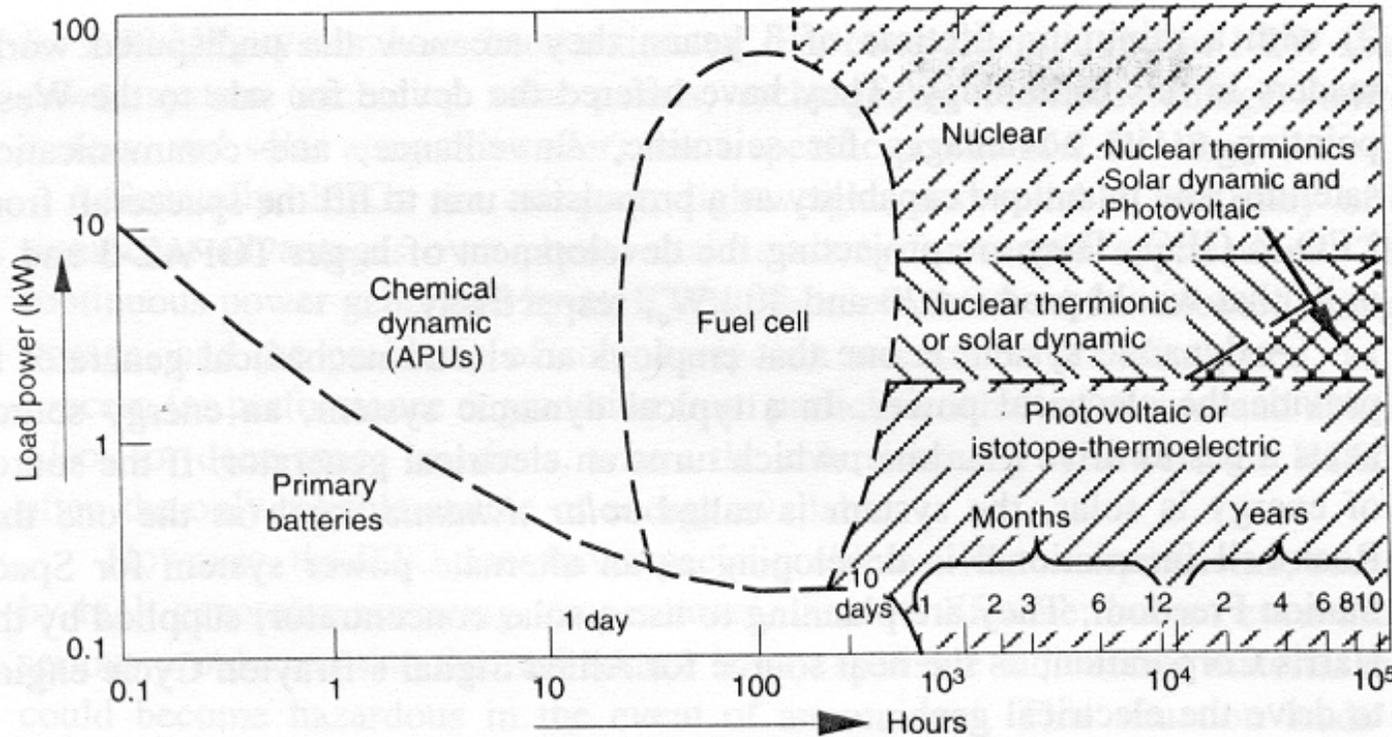


Fig.: Faixas aproximadas de aplicação das diferentes fontes primárias de energia .

Ref. [7]

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Células Solares

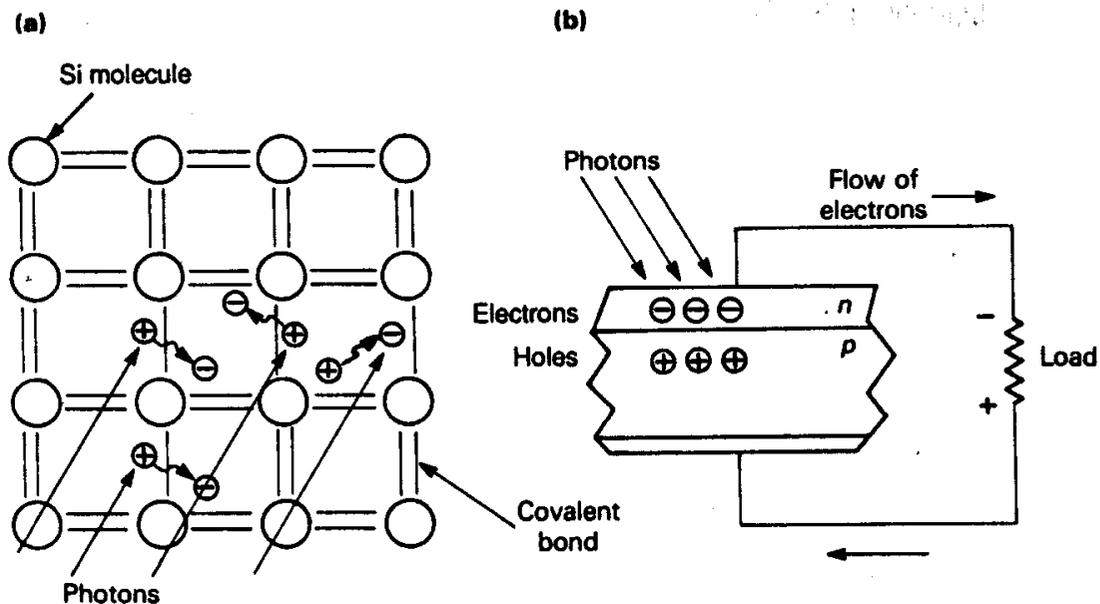


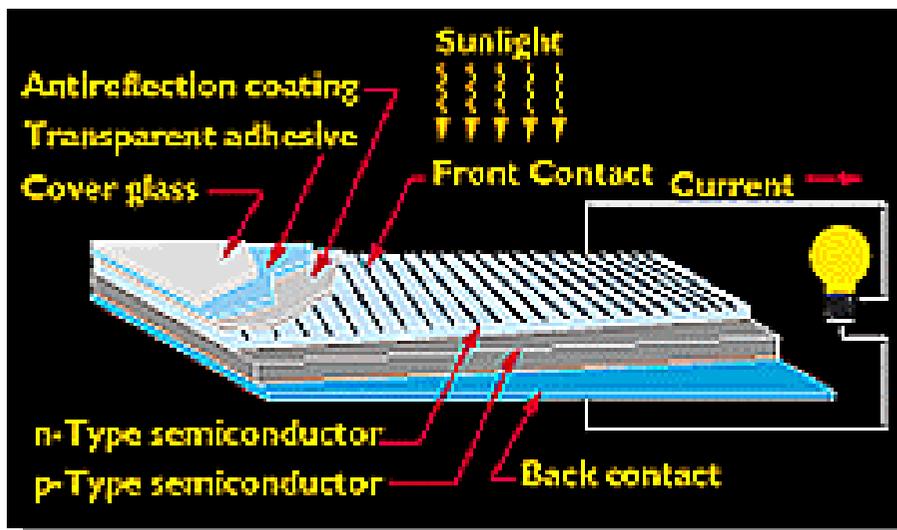
Fig.: Ilustração do *efeito fotovoltaico*:

(a) Estrutura do cristal

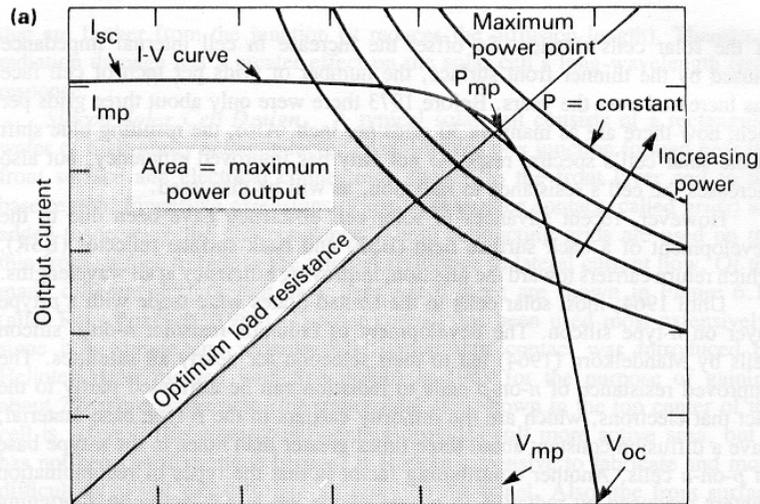
(b) Junção *p-n*

- Quando uma junção *p-n* é produzida em um cristal, elétrons do lado *n* difundem-se no lado *p* e “furos” do lado *p* difundem-se no lado *n*. Tanto uns quanto os outros acabam sendo neutralizados, mas contribuem para a manutenção de uma diferença de potencial, cujo campo elétrico é utilizado para a geração de energia.

- Quando a luz solar é absorvida na região próxima à junção *p-n* da célula solar alguns elétrons e “furos” irão difundir na junção. Neste momento, as cargas serão separadas pelo campo elétrico da junção, criando assim uma corrente que pode circular por uma carga externa. Este método de conversão direta de luz em energia elétrica é denominado “efeito fotovoltaico”.



## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Células Solares (cont.)



**Fig.: Característica de saída de células solares:**  
**(a) Curva  $I$ - $V$  (corrente-voltagem)**  
**(b) Curva  $P$ - $V$  (potência-voltagem)**

### Legenda:

$P$  Potência

$V$  Voltagem

$I$  Corrente

$I_{sc}$  Corrente de curto circuito

$V_{oc}$  Voltagem de circuito aberto

$I_{mp}$  Corrente de máxima potência

$V_{mp}$  Voltagem de máxima potência

$P_{mp}$  Potência máxima

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Células Solares (cont.)

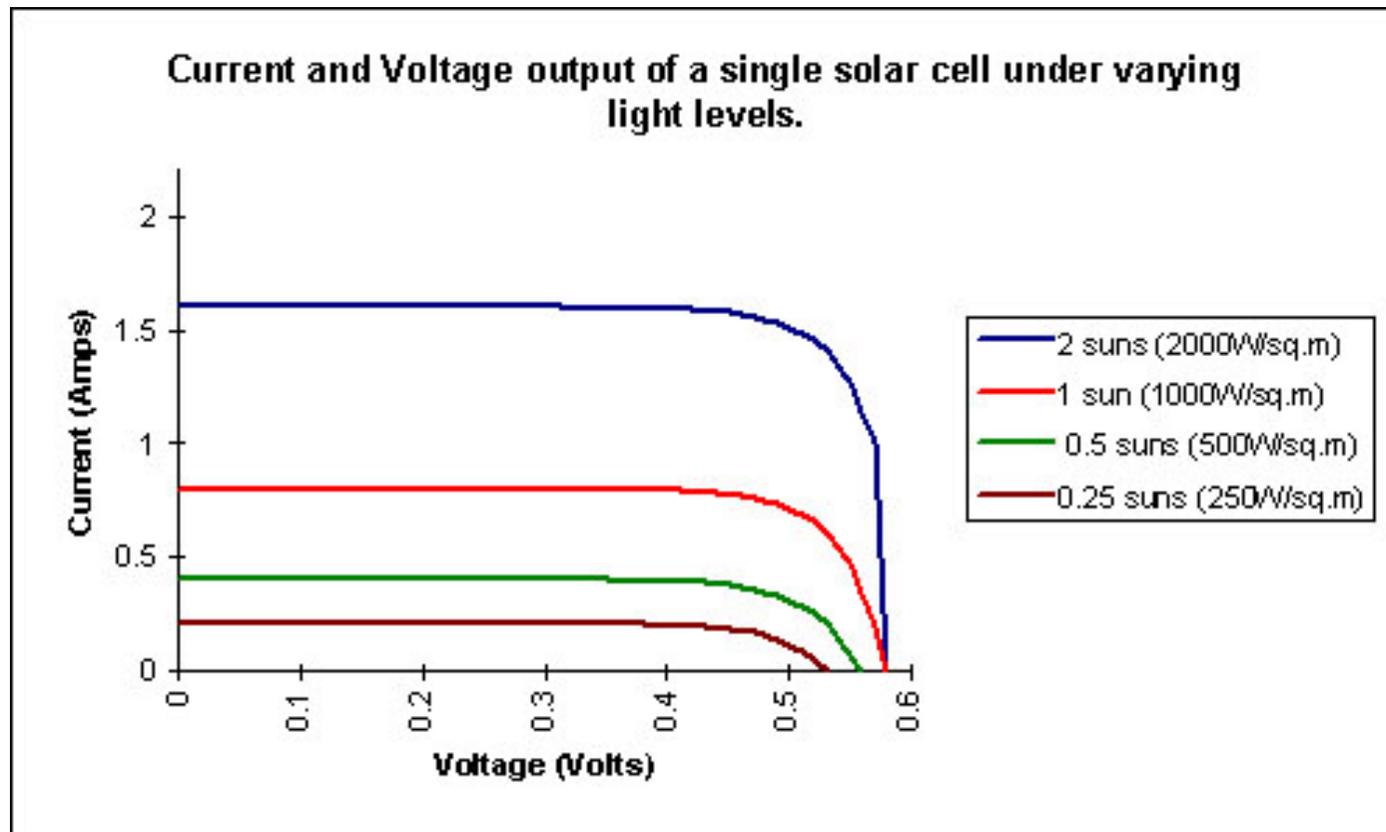


Fig.: Exemplo de correntes e voltagens típicas de saída de uma célula solar sob condições variáveis de iluminação.

- A incidência média de energia solar é tomada como  $1\text{kW/m}^2$ .

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Células Solares (cont.)

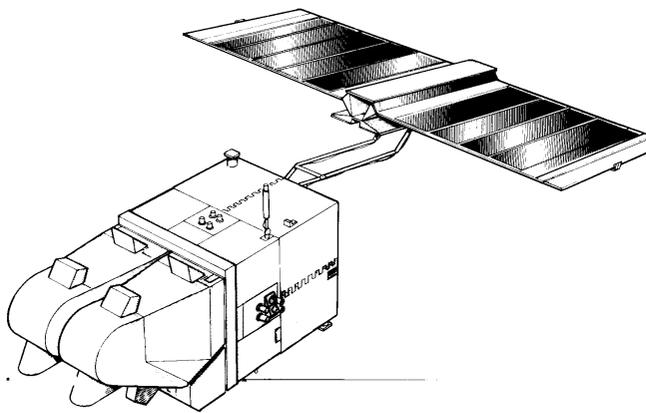
**Tabela:** Historical development of solar cell technology

Year	Development	Efficiency (%)
1953	Lithium-diffused p-type, $n$ on $p$ cell.	4
1954	Boron-doped large-area $p$ on $n$ cell.	6
1955	Theoretical understanding of solar cells and analytical treatment.	
1957	Wraparound-type solar cell so that both the electrical contacts are on the back surface and optimum thickness to reduce resistive losses.	10
	Both the contacts on the front surface. Achieved more consistent efficiency.	10
	Fingerlike contacts (grids) on top surface for redundancy, reducing resistive losses.	>10
1964	Improved $n$ on $p$ cells for better radiation resistance, resulting in reduced damage from radiation; $\frac{1}{4}$ $\mu\text{m}$ diffuse junction and silicon monoxide antireflection coatings.	>10
1964	“Blue”-sensitive solar cells with very shallow diffused $n$ layers having good surface properties and antireflection coating to radiation hardness.	>10
1973	Very shallow diffused junctions and improved antireflection coatings resulting in improvements in short-wavelength collection efficiency and overall efficiency.	12
	Back surface reflector placed on the rear side of the solar cell would reflect some of the long-wavelength infrared energy back out through the cell.	12.9
1974–80	Very low-reflectivity cells (black cells) leading to further improvements in efficiency.	
	Selective etching to form numerous pyramidal-shaped structures, which trap more of the incident light by multiple reflection. Addition of a back surface reflector and a $p^+$ field adjacent to the back contact.	14
	Introduction of a layer of palladium in between silver and titanium contacts to eliminate moisture contamination.	
Recent activity	Gallium arsenide solar cells developed recently exhibit about 18.7% efficiency and have been flown on LIPS spacecraft solar cell experiment. A few cells approaching 20% have been produced in the laboratory. They are also being used on some classified spacecraft. But the cells are thicker, twice as dense, and five times the cost of silicon cells.	18
	Indium phosphide cells show the promise of higher efficiency and have less susceptibility to radiation. However, they are still in the development stage.	17

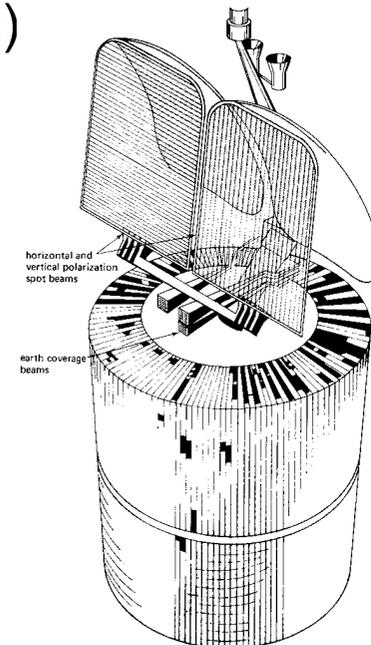
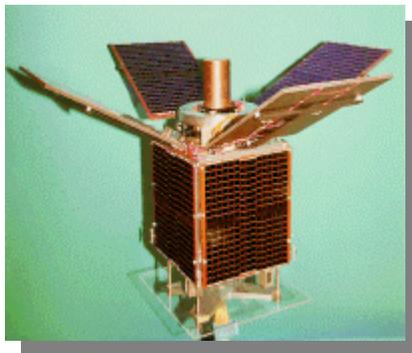
Source: Chetty (1988).

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Geradores Solares

- Tecnologias disponíveis: Silício (Si) ou Arseneto de Gálio (GaAs)
- Montagens dependentes da missão:



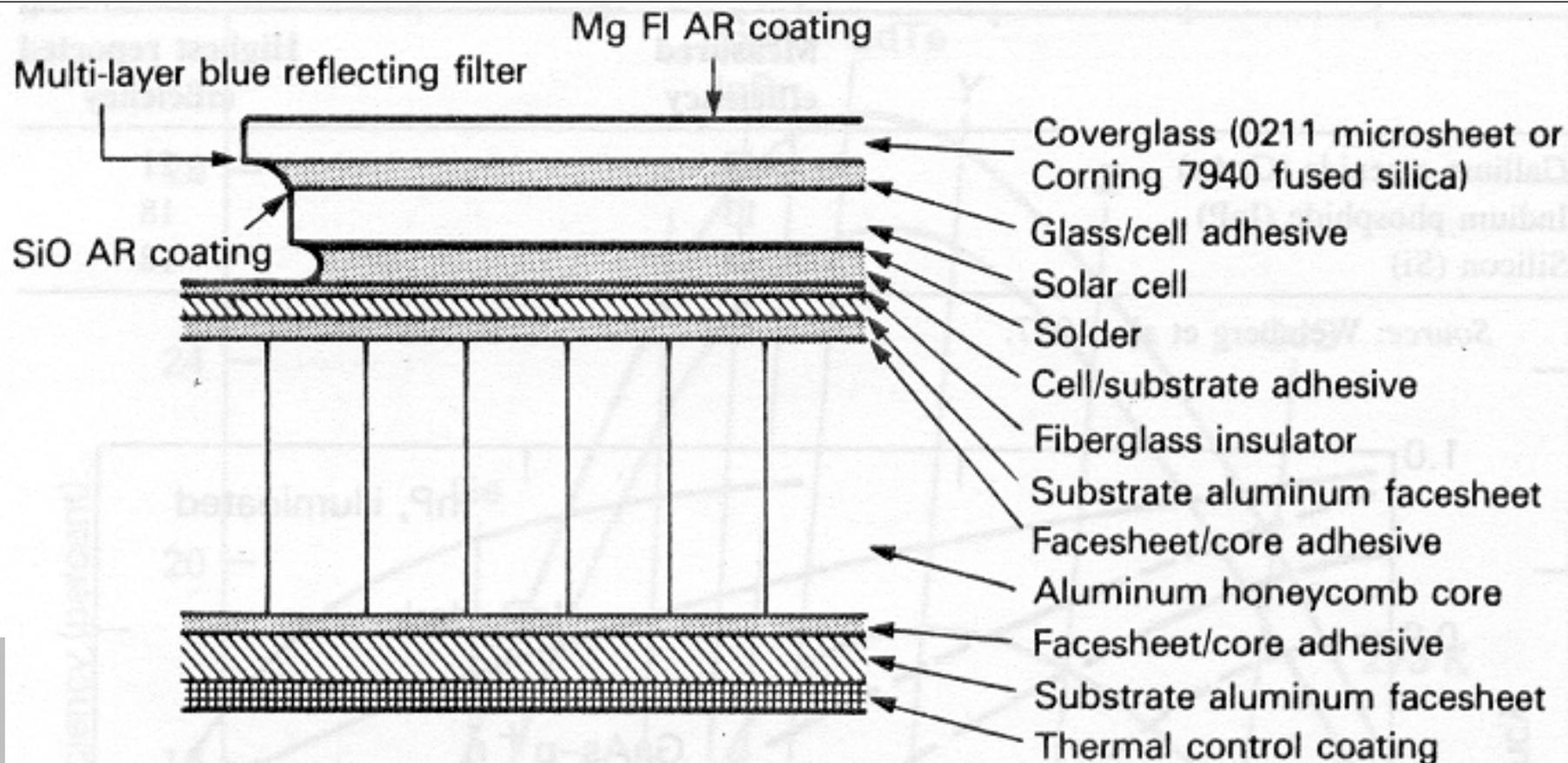
**Montado em Painéis**



**Montado sobre o Corpo**

- Avaliação de opções (Trade-offs):
  - **Tecnologia de Silício (Si) x Arseneto de Gálio (GaAs):** Diferenças em eficiência, área das células, e custo.
  - **Montagens:** Apontamento do painel, simplificação do ACS, necessidade de mecanismo de rotação do painel solar (BAPTA).
  - **Tipo de bateria.**

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Geradores Solares (cont.)



Ref. [7]

**Fig.: Seção transversal típica de um painel solar (AR = antireflecting).**

Para maximizar a eficiência da célula solar, o painel deve ser desenhado para absorver o máximo possível da radiação solar útil e permanecer o mais frio possível. A “coverglass” deve ter alta emissividade e baixa refletividade. A radiação ultravioleta deve ser barrada, pois causa degradação dos adesivos. A condutância térmica através do painel deve ser a maior possível, bem como a emissividade da camada traseira.

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Geradores Solares (cont.)

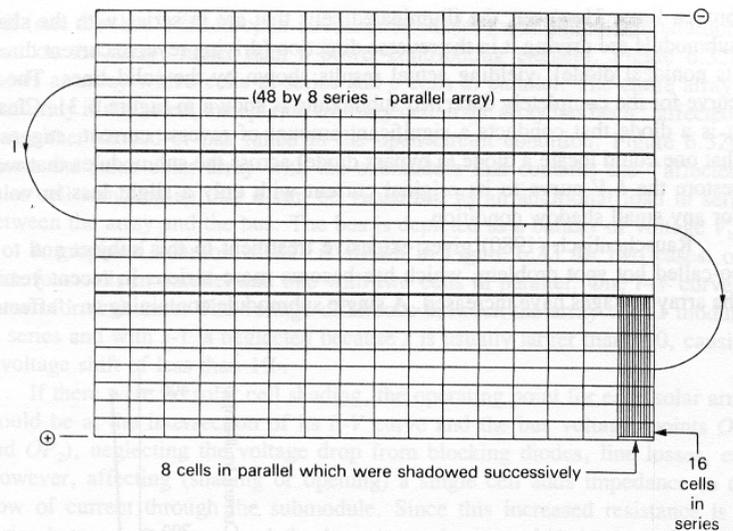


FIG. 6.29. A series-parallel solar cell circuit showing the shaded area.

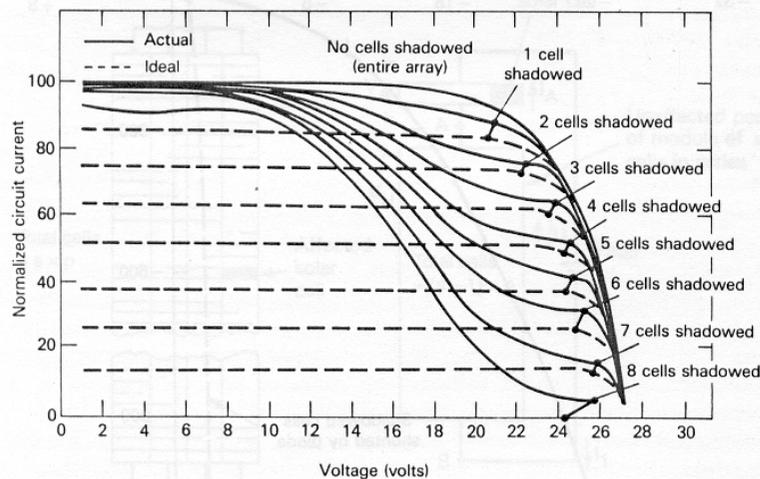


Fig.: Circuito série-paralelo de células solares mostrando uma área encoberta (3 submódulos de 16 células em série e 8 células em paralelo).

- A interconexão de células solares segue os mesmos princípios das ligações de baterias, ou seja: a voltagem total é igual à soma da voltagem das células em série e a corrente total é a soma das correntes das células em paralelo.

- Os painéis solares são sempre uma composição de circuitos série-paralelo de células solares. Isto é feito com dois objetivos:

- Ajustar a voltagem e a corrente de saída do painel à demanda do satélite.

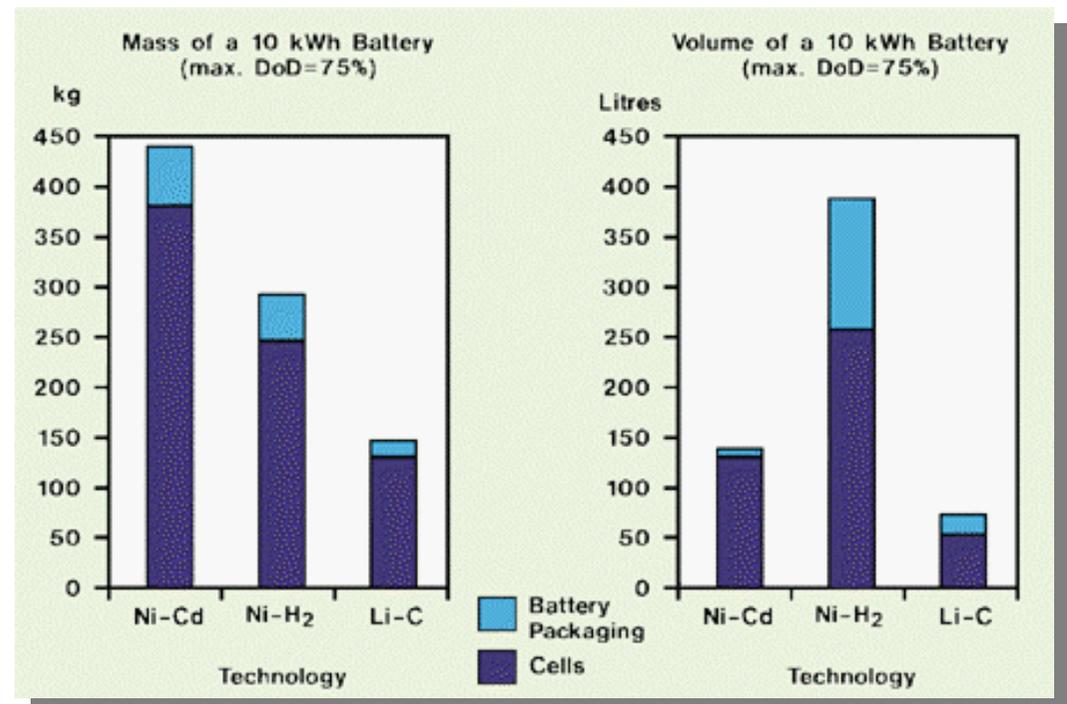
- Criar um sistema robusto e de alta confiabilidade, capaz de continuar operando mesmo com falhas em um número limitado de células solares.

- O dimensionamento dos painéis solares é sempre feito considerando o seu desempenho no início da vida (Beginning of Life – BOL) e final da vida (End of Life – EOL), pois a degradação das células ao longo do tempo reduz a sua eficiência.

Fig.: Curvas I-V correspondentes ao sombreamento de uma célula por vez.

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Baterias

- Baterias secundárias armazenam o excesso de energia gerada pelo subsistema enquanto os painéis são iluminados e abastece o satélite durante os eclipses (passagem por detrás da Terra).
- Satélites utilizam baterias com diversas tecnologias. As mais comuns são Níquel-Cádmio (NiCd) e Níquel-Hidrogênio (NiH<sub>2</sub>). Mais recentemente surgiram as de Lítio-Íon.
- Baterias tem vida útil limitada, que depende da “Profundidade de Descarga” (DOD) de seus ciclos de operação. Quanto maior a DOD, menor a vida útil. O dimensionamento da bancada de baterias deve necessariamente considerar este efeito.



## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Baterias (cont.)

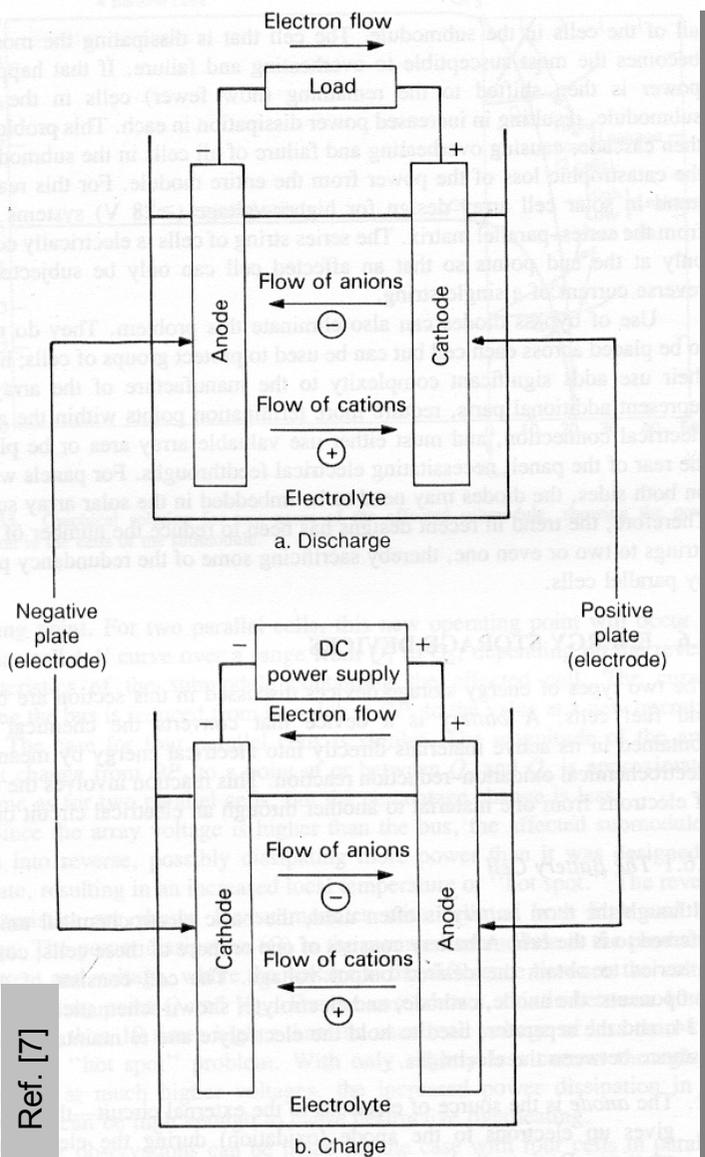
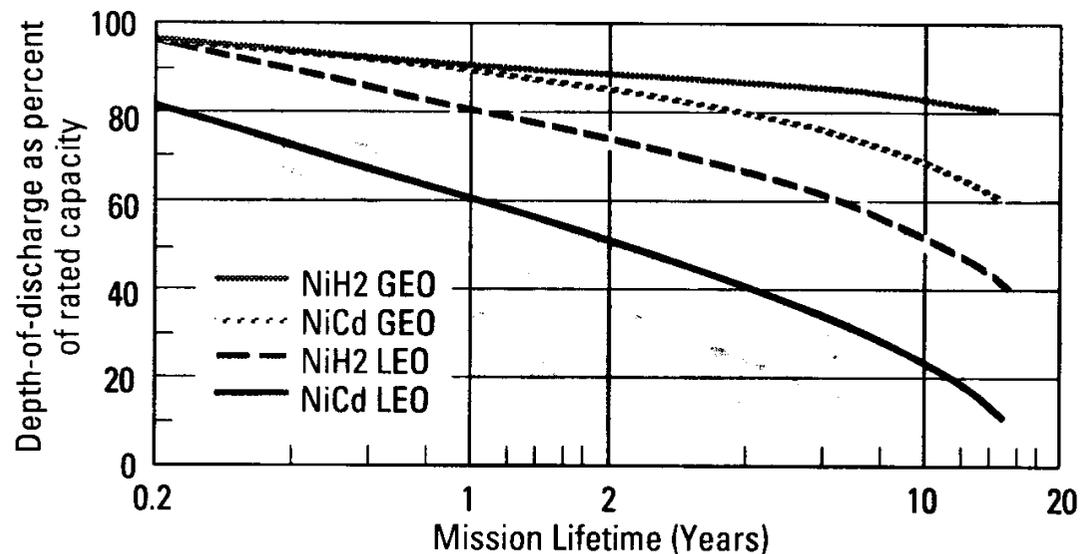


Fig.: Operação eletroquímica da célula de uma bateria nos ciclos de descarga (a) e carga (b).

- Uma célula de bateria tem quatro partes principais:
  - **Ânodo:** Fonte de elétrons durante o ciclo de descarga.
  - **Cátodo:** Sorvedouro de elétrons durante o ciclo de carga.
  - **Eletrólito:** Sólido ou líquido condutor de íons entre os eletrodos.
  - **Separador:** Mantém as placas da bateria na posição correta.

Fig.: Curvas de vida e profundidade de descarga para vários tipos de bateria.



## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Baterias (cont.)

Tabela: Characteristics of secondary batteries for spacecraft use

	Silver zinc	Nickel cadmium	Nickel hydrogen
Energy density (W h/kg)	90	35	75
Energy density (W h/dm <sup>3</sup> )	245	90	60
Operating temperature range (°C)	0–20	0–20	0–40
Storage temperature (°C) <sup>a</sup>	0–30	0–30	0–30
Dry storage life	5 yr	5 yr	5 yr <sup>b</sup>
Wet storage life	30–90 days	2 yr	2 yr
Maximum cycle life (approx.)	200	20,000	20,000 <sup>b</sup>
Open circuit (V/cell)	1.9	1.35	1.55
Discharge (V/cell)	1.8–1.5	1.25	1.25
Charge (V/cell)	2.0	1.45	1.50
Manufacturers	Eagle-Picher, Yardney Technical Products	Eagle-Picher, Gates Aerospace Batteries	Eagle-Picher, Yardney Technical Products, Gates Aerospace Batteries, Hughes

**Nickel Hydrogen System**

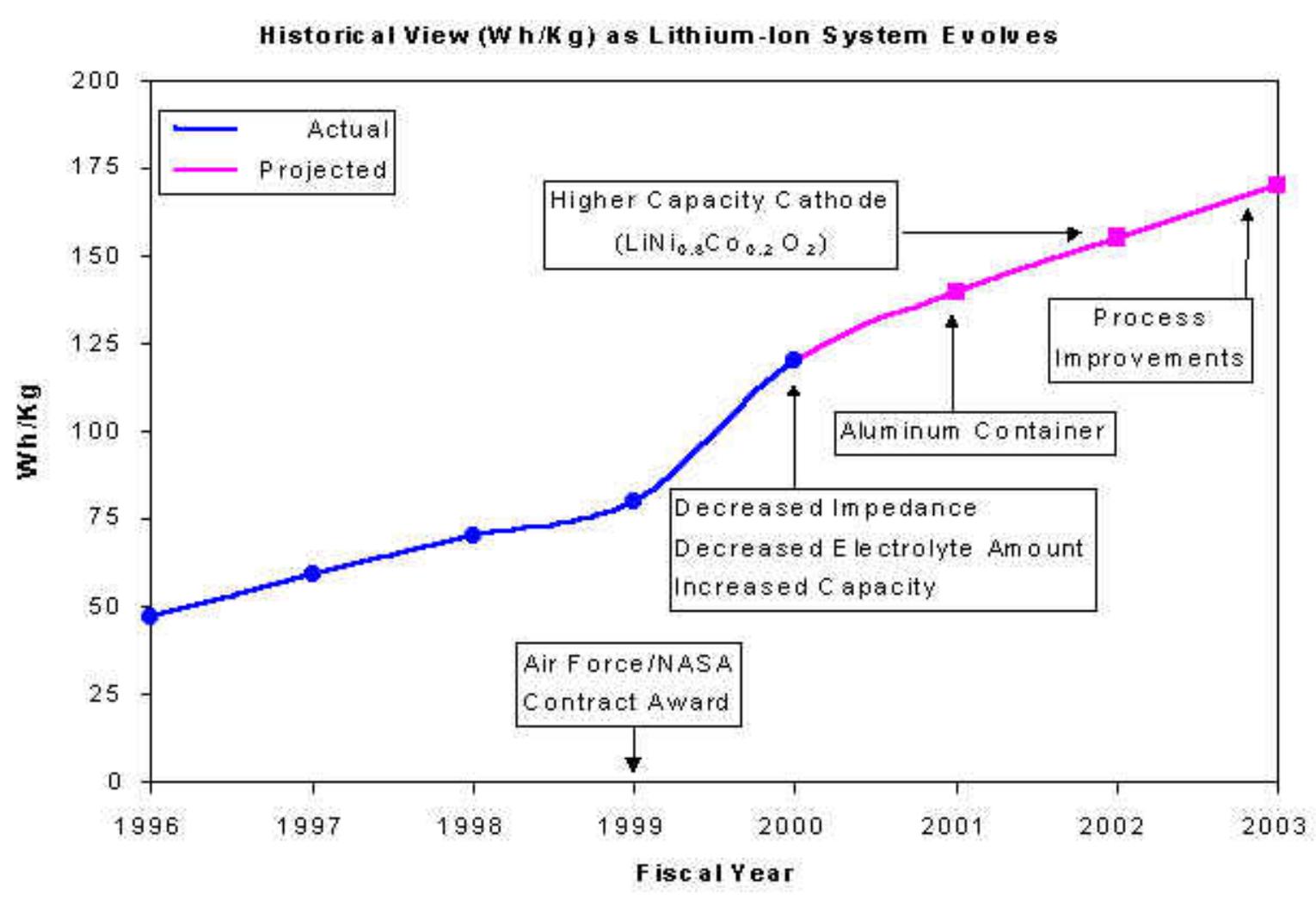


Ref. [7]

<sup>a</sup>Ideal storage temperature for all batteries is 0 to 5°C.

<sup>b</sup>Nickel hydrogen cells are still developing and may prove to have storage and cycle life well beyond that indicated.

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Baterias (cont.)



## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Reguladores

---

- Para ampliar a vida das baterias e das células solares, bem como para garantir a segurança da operação, é necessário que a recarga das baterias seja feita em condições previamente especificadas para os limites de corrente. Para cumprir esta função existem dispositivos eletro/eletrônicos denominados “reguladores”.
- Dois tipos de reguladores são adotados:
  - Regulador em série: É montado entre os painéis e as baterias e atua elevando a voltagem para reduzir a potência que flui para as baterias.
    - Tipos: Linear e Seqüencial Linear.
  - Regulador em paralelo (“shunt”): É montado em paralelo à linha que vai dos painéis às baterias.
    - Tipos: Linear, Linear Parcial, Linear Seqüencial e Digital.

## 2.3 – Subsistema de Suprimento de Energia: Conversores

---

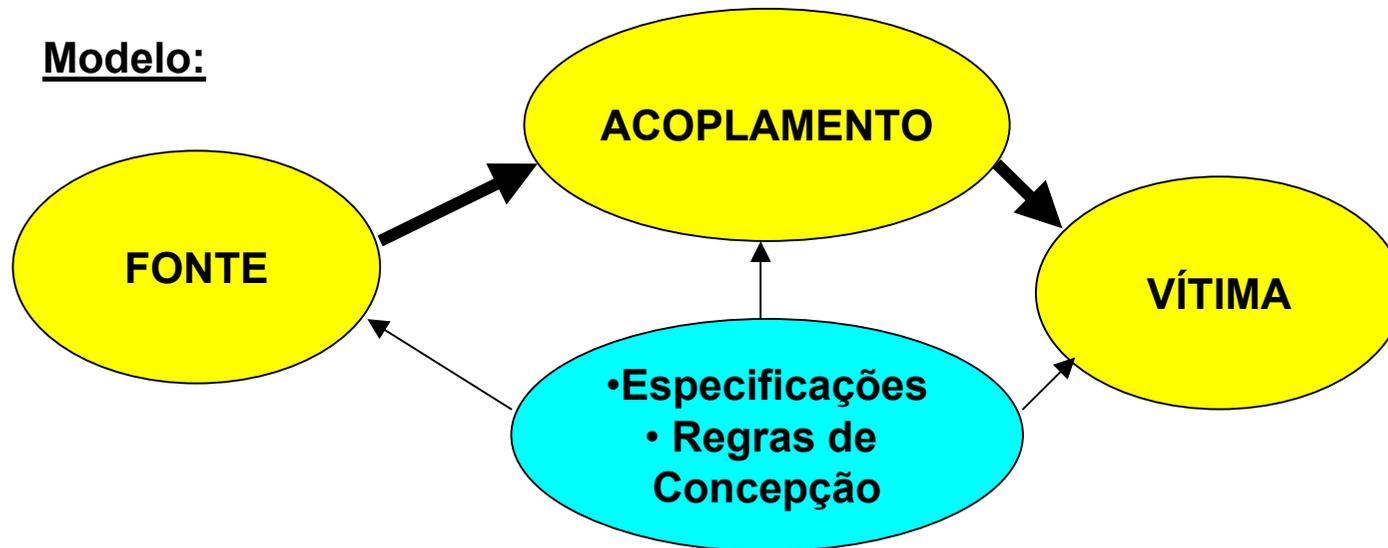
- A alimentação das cargas do satélite pode ser por sistemas regulados ou não.
- As cargas do satélite devem ser projetadas de acordo com a alimentação a ser fornecida (regulada ou não).
- Sistemas regulados são caros e adicionam risco ao projeto, pois as cargas passam a depender da sua qualidade de regulação para seu bom funcionamento.
- Sistemas não regulados são bastante comuns, particularmente nos casos em que as cargas e o Subsistema de Suprimento de Energia são projetados simultaneamente. Neste caso as cargas são responsáveis pelo condicionamento de sua própria potência.



## 2.3 – Compatibilidade Eletromagnética

---

- É a capacidade de um sistema de funcionar sem degradação de desempenho devida ao ambiente eletromagnético no qual deve operar.
- Dois efeitos estão presentes:
  - **Interferência Eletromagnética (Electro Magnetic Interference – EMI)**: Indica o quanto que um equipamento emite em ondas eletromagnéticas que podem potencialmente interferir em outros equipamentos.
  - **Compatibilidade Eletromagnética (Electro Magnetic Compatibility – EMC)**: Indica a capacidade de um equipamento de continuar operando adequadamente quando imerso nas perturbações eletromagnéticas induzidas por outros equipamentos.



- **Aterramento:**

- Evitar retorno de corrente pela estrutura.
- Ponto de Terra Único (SPG) nos primários.
- Regras para aterramento de blindagens e retornos de TM e TC.

- **Cablagem:**

- Classificação e separação física de cabos (Power, TC, TM, Pirotécnicos).
- Separação em nível de conectores.
- Utilização de pares trançados e blindagem.
- Isolação de TC's por acopladores óticos.

- **Proteção:**

- Fusíveis.
- Relés.
- Limitadores de Corrente (Falhas e In-Rush).