



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

SEMANA NACIONAL
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA 2015
LUZ, CIÊNCIA E VIDA

“Utilização de painéis solares em satélites”

Palestrante: MSc. Mario Ferreira Baruel

mario.baruel@inpe.br

INPE – www.inpe.br

Divisão de Eletrônica Espacial , DEA

Grupo de Suprimento de Energia, PSS

Engenharia e Tecnologia Espacial, ETE

Outubro , 2015

SUMÁRIO

- **Energia solar e sua aplicação em satélites**
 - **ENERGIA SOLAR, ESPECTRO, CONVERSÃO, AQUECIMENTO;**
 - **CÉLULAS SOLARES, EFEITO FOTOVOLTAICO, USO ESPACIAL;**
 - **SUPRIMENTO DE ENERGIA DE SATÉLITES, DIAGRAMA DE BLOCOS;**
 - **MONTAGEM DE GERADORES SOLARES;**
 - **OS SATÉLITES PRODUZIDOS NO INPE;**
 - **GERADORES SOLARES, ASSOCIAÇÕES,**
 - **CURVAS CARACTERÍSTICAS, TRIPLA JUNÇÃO, EFICIENCIA;**
 - **COMPONENTES BÁSICOS;**
 - **PROJETO ELÉTRICO, MECÂNICO, COMPUTACIONAL;**
 - **EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE;**
 - **TRANSPORTE E TESTES;**
 - **LANÇAMENTO CBERS4;**
 - **PERGUNTAS**

Energia solar

O Sol é a nossa principal fonte de energia. É composto de 92% de gás hidrogênio pressurizado pelo forte campo gravitacional. Por meio da fusão nuclear, esse hidrogênio é convertido em átomos de hélio. Esse processo libera energia em forma de fluxo de fótons – pacotes de ondas eletromagnéticas – que escapam do Sol em todas as direções do cosmos.

O planeta Terra, distante 150 milhões de quilômetros do Sol, recebe em média, por minuto, a mesma quantidade de energia que a produzida pela usina hidrelétrica de Itaipu durante 25 anos. Apenas a superfície do Brasil recebe, por minuto, a mesma energia que essa usina demora a produzir em seis meses!

A luz solar é composta por fótons, que são caracterizados por sua frequência ou comprimento de onda. A energia de cada fóton aumenta com a diminuição do seu comprimento de onda ou com o aumento de sua frequência.

Conversão de energia solar

A energia solar pode ser convertida diretamente em outras formas de energia.

As duas formas de energia mais conhecidas são a energia térmica e a energia elétrica. A conversão em energia térmica é largamente usada em secagem de grãos e no aquecimento de fluidos (como aquecimento de água em residências e hospitais, por exemplo).

A conversão direta da energia solar em energia elétrica é feita através de células solares, que são dispositivos semicondutores. Elas são fabricadas a partir da mesma tecnologia utilizada na produção dos chips de computadores.

O fenômeno físico responsável pelo funcionamento de uma célula solar é chamado de efeito fotovoltaico.

Aquecimento por energia solar



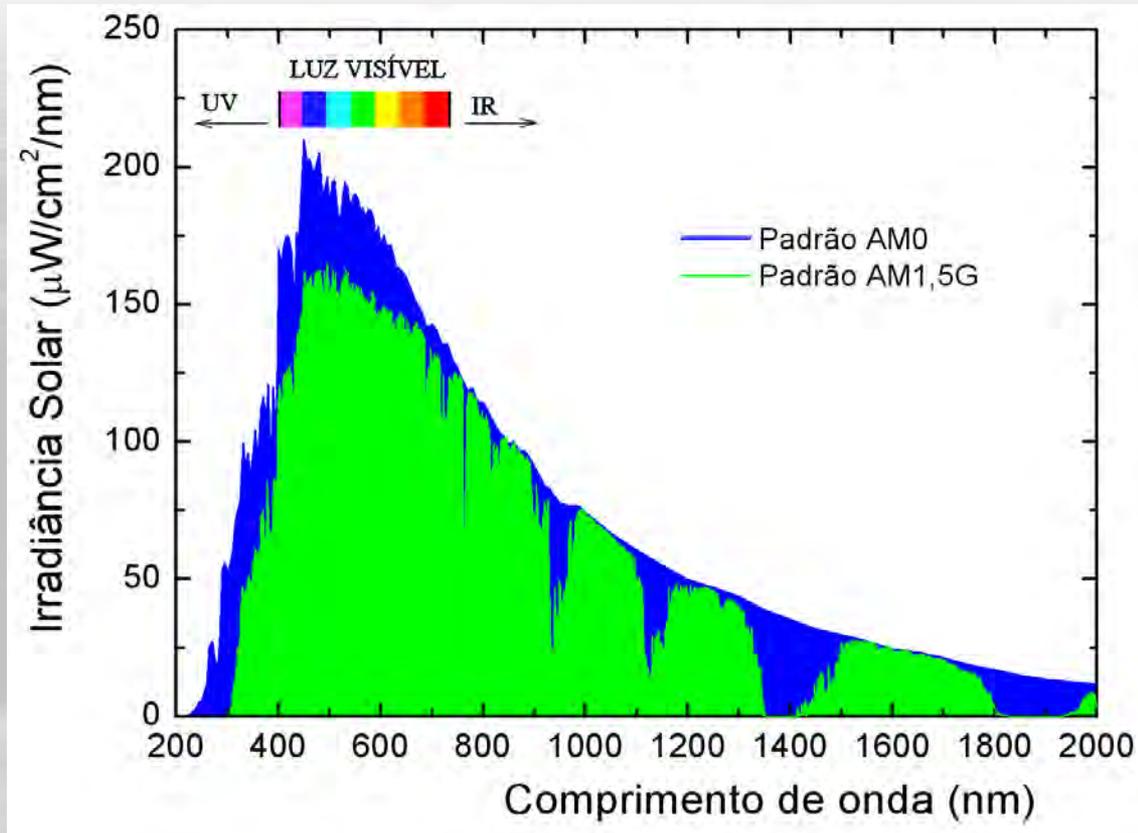
Sistema residencial de aquecimento de água por energia solar (coletor solar).

Transformação de energia solar em elétrica

Painéis solares - Uso terrestre

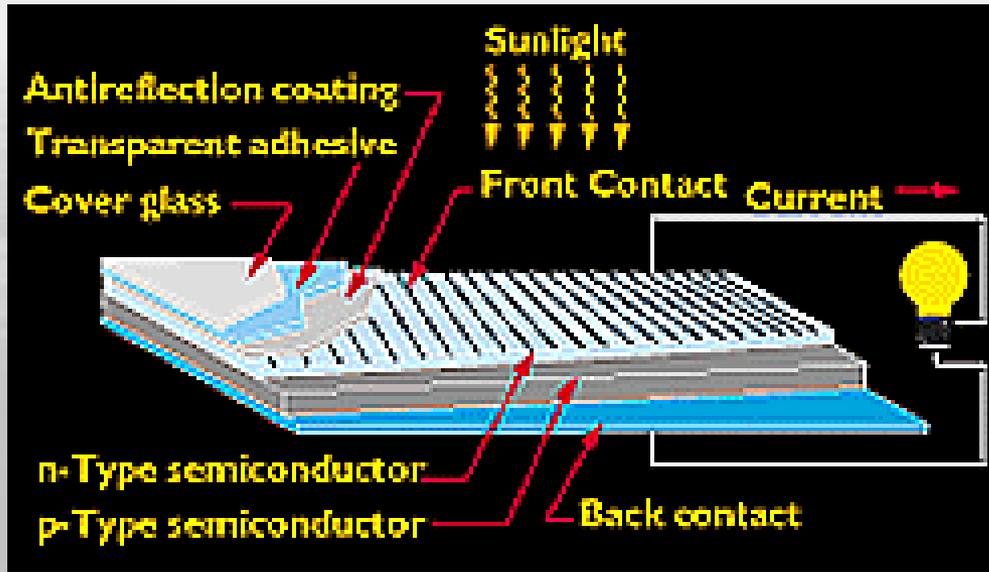


Espectro da Energia solar

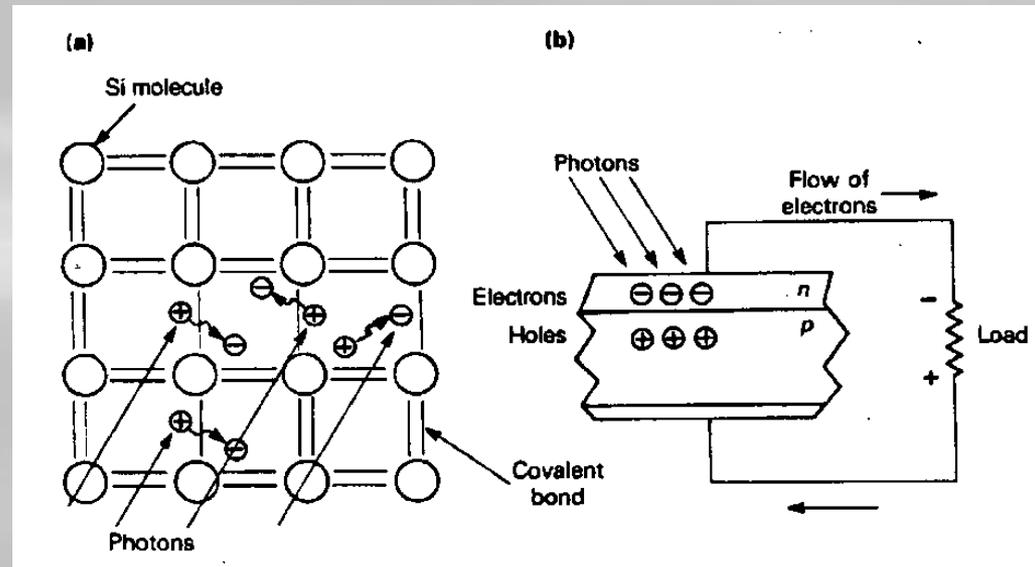


Distribuição da energia dos fótons provenientes do Sol que chega ao planeta Terra. A curva externa, a área azul, corresponde ao espectro fora da atmosfera; a curva interna, a área verde, é o espectro que chega à superfície da Terra em um dia claro, sem nuvens, por volta do meio-dia.

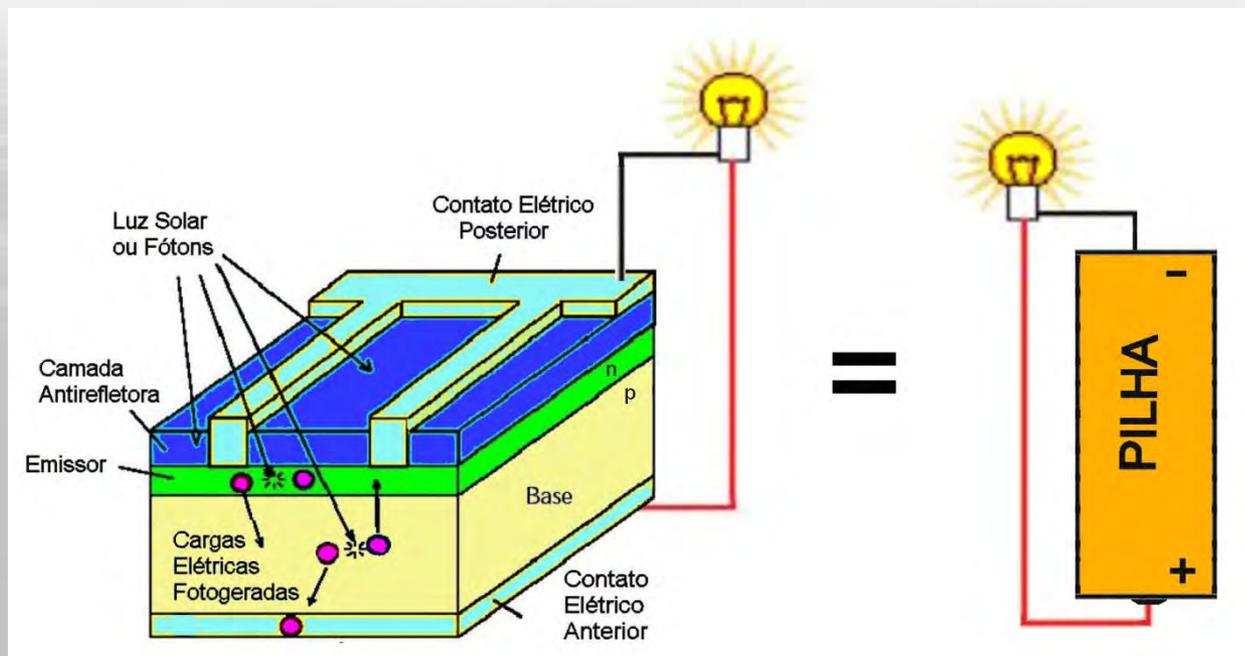
Células solares - Efeito fotovoltaico



Relatado por Edmond Becquerel em 1839 que consiste no aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de material semiconductor pela absorção da luz;



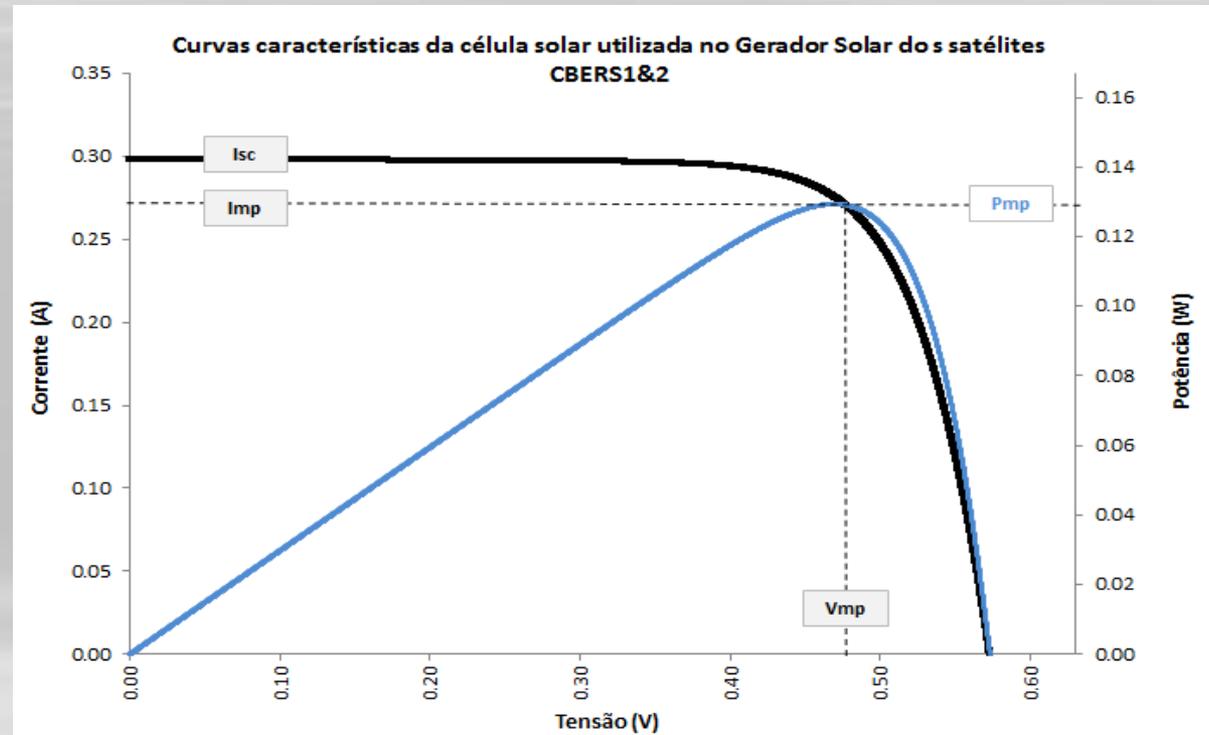
Uso espacial do efeito fotovoltaico



Em 1876 foi concebido o primeiro aparato fotovoltaico mas somente em 1956 iniciou-se a produção industrial de células fotovoltaicas. Por coincidência, os anos seguintes também foram marcados pela corrida espacial e produção dos satélites artificiais. Esses satélites, que possuíam suas baterias alimentadas por fontes radioativas, começaram a utilizar células solares como geradores de potência elétrica. O primeiro satélite a usar célula solar foi o Vanguard I, colocado em órbita em 1958.

Curvas características

- (a) Curva I - V (corrente-voltagem) - preto
- (b) Curva P - V (potência-voltagem) - azul



Legenda:

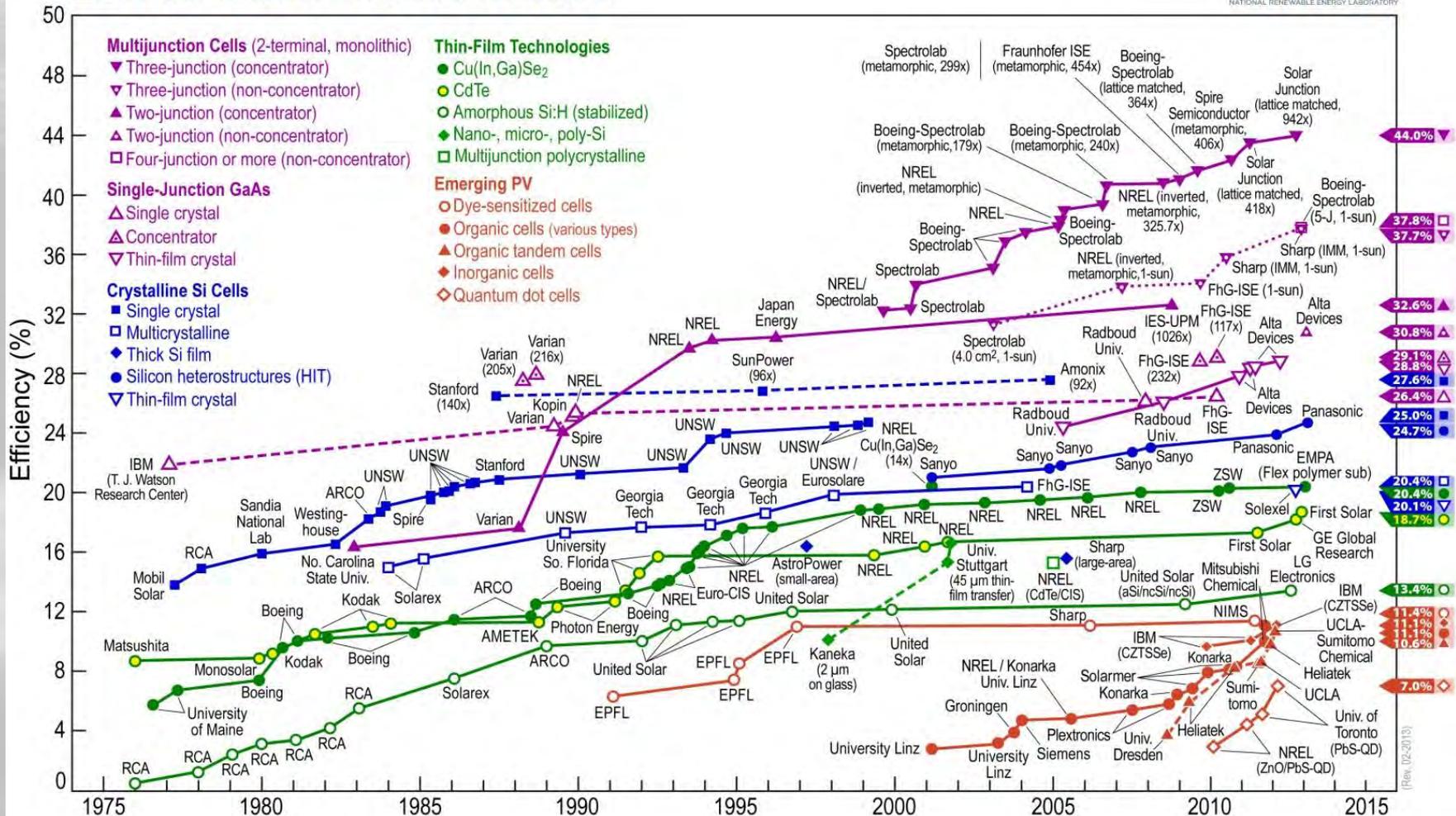
- I_{sc} - Corrente de curto circuito
- V_{oc} - Voltagem de circuito aberto
- I_{mp} - Corrente de máxima potência
- V_{mp} - Voltagem de máxima potência
- P_{mp} - Potência máxima

Eficiência

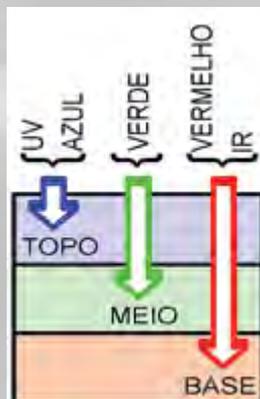
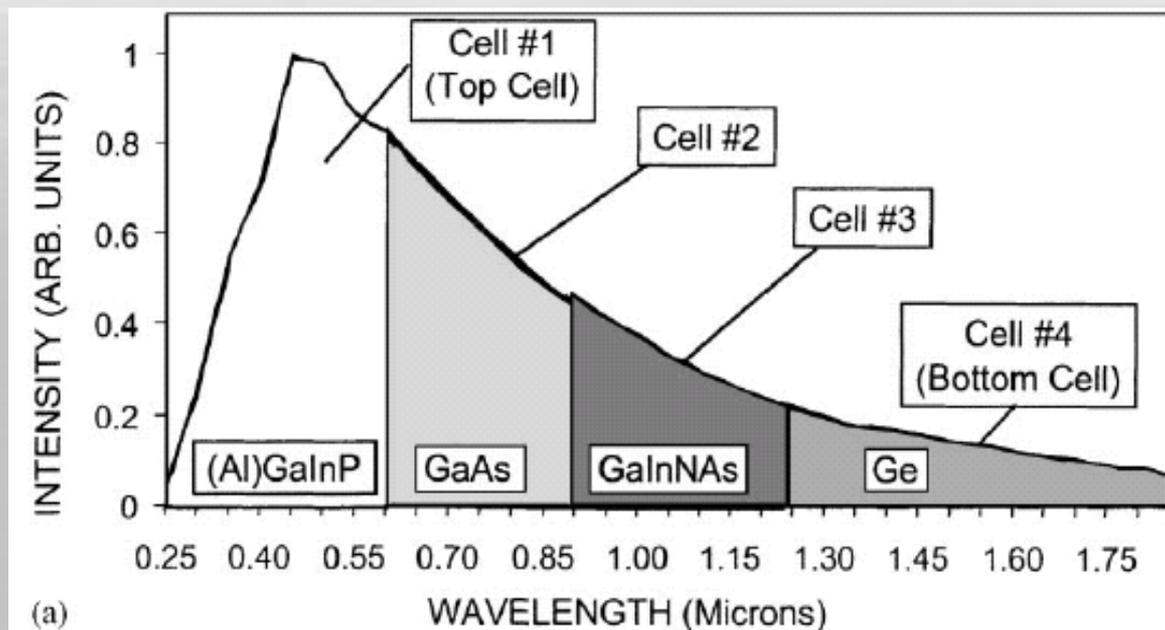
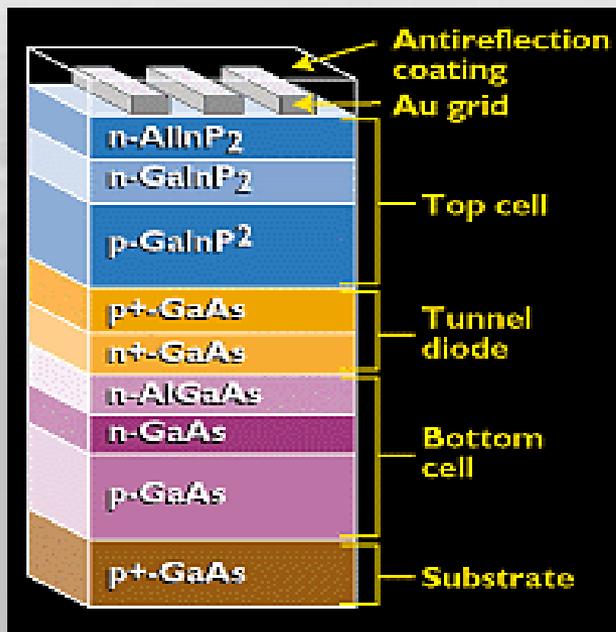
Eficiência de conversão é a potência gerada pela célula dividida pela potência da iluminação na área total da célula solar.



Best Research-Cell Efficiencies



Célula Solar de tripla junção



Aumento da eficiência de conversão:

- 2 junctions – 50%
- 3 junctions – 56%
- 36 junctions – 72%

Associação de células solares

Para obter ganho de tensão e corrente: arranjo das células nos módulos podem ser feito conectando-as em série e em paralelo.

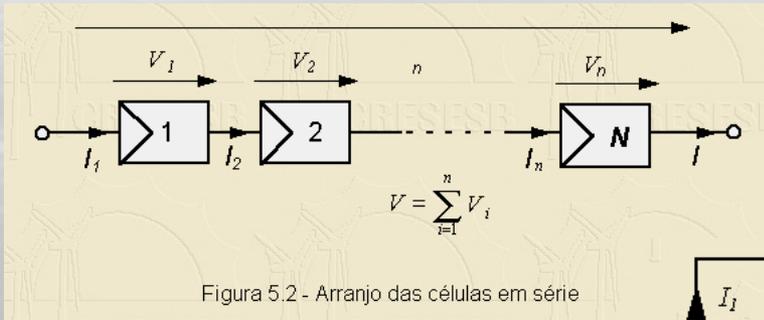


Figura 5.2 - Arranjo das células em série

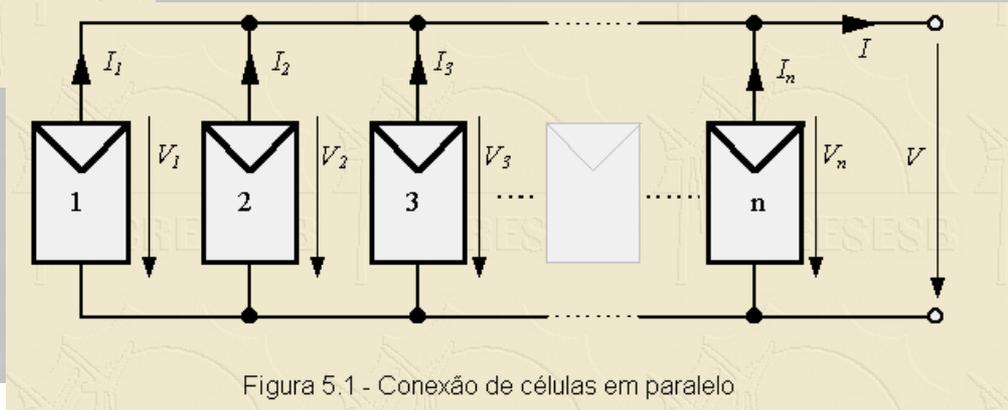
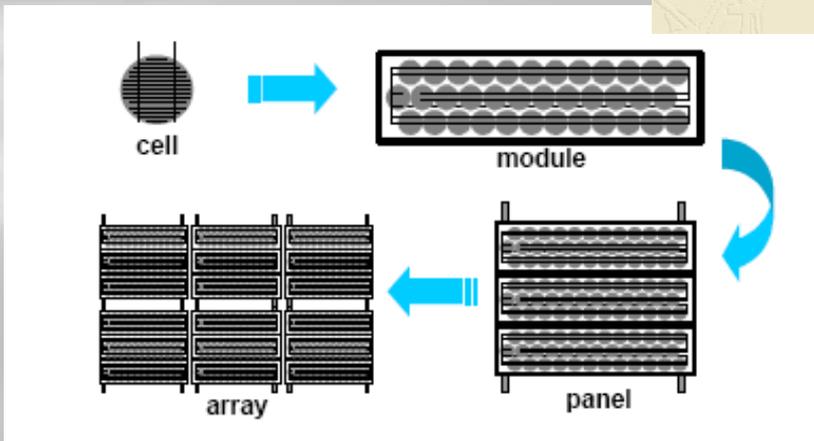


Figura 5.1 - Conexão de células em paralelo



GERADORES SOLARES



CUBESAT



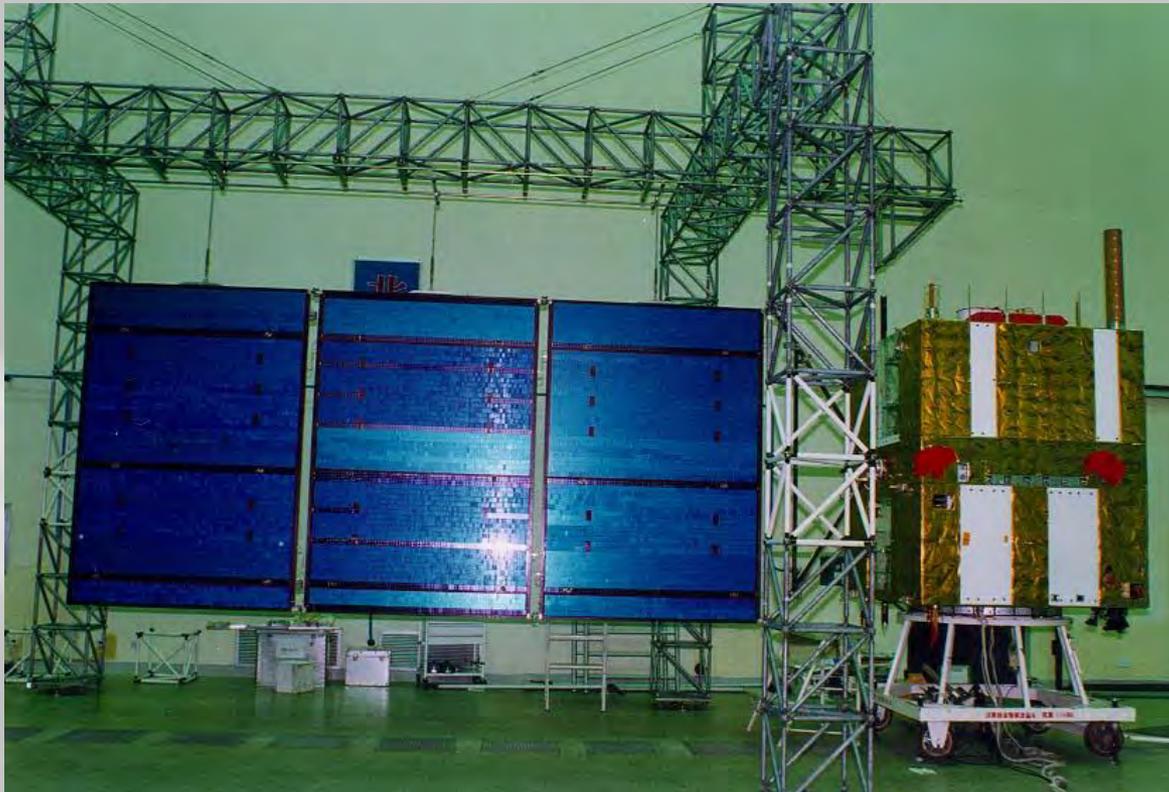
ENVISAT

- **Usado na imensa maioria dos satélites;**
- **Capacidade desde alguns poucos watts até $>100\text{kW}$;**
- **Solução ótima para missões em órbita da Terra;**
- **Usa arranjo elétrico série-paralelo de grande número de células solares;**
- **Montado do lado de fora do satélite e com grande área exposta a luz solar;**
- **Exposição ao ambiente espacial causa degradação das células solares;**
- **Precisa de fonte secundária para suprir energia em caso de falta de iluminação; (fases de ascensão, aquisição do Sol, eclipses, etc.).**

Montagem de Geradores solares 2/2

GERADOR SOLAR DO TIPO ASA EXTENSÍVEL

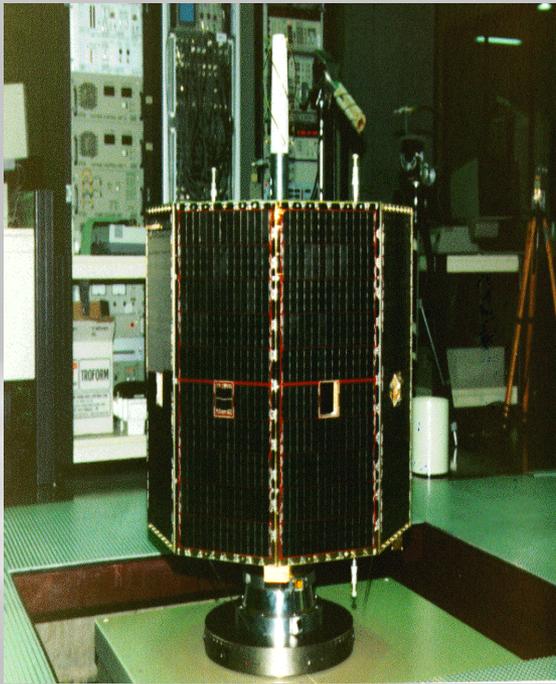
CBERS1 CONFIGURAÇÃO ORBITAL



**CBERS1
CONFIGURAÇÃO DE LANÇAMENTO**



Montagem de Geradores solares 1/2



Montados no corpo do satélite



Configuração de Lançamento

Configuração Orbital



Articulado ao corpo do satélite

Os Satélites produzidos pelo INPE

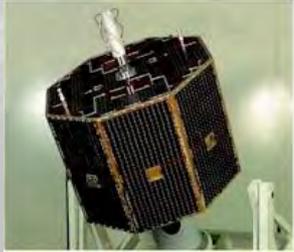
fev/93

nov/97

out/98

out/99

SCD1 - Silício



Sucesso

SCD2A - Silício



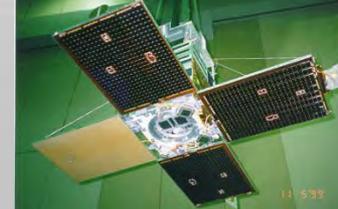
Falha do foguete

SCD2 - Silício



Sucesso

SACI1- AsGa



Falha do satélite

CBERS1 - Silício



Sucesso

dez/99

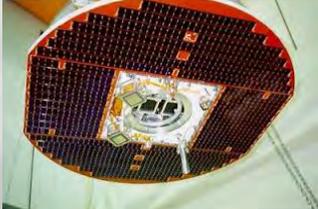
ago/03

out/03

set/07

dez/13 e dez/14

SACI2 - AsGa



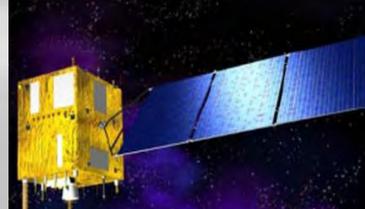
Falha do foguete

SATEC - Silício



Falha do foguete

CBERS2 - Silício



Sucesso

CBERS2B - Silício



Sucesso

CBERS3&4 - GaInP/InGaAs/Ge



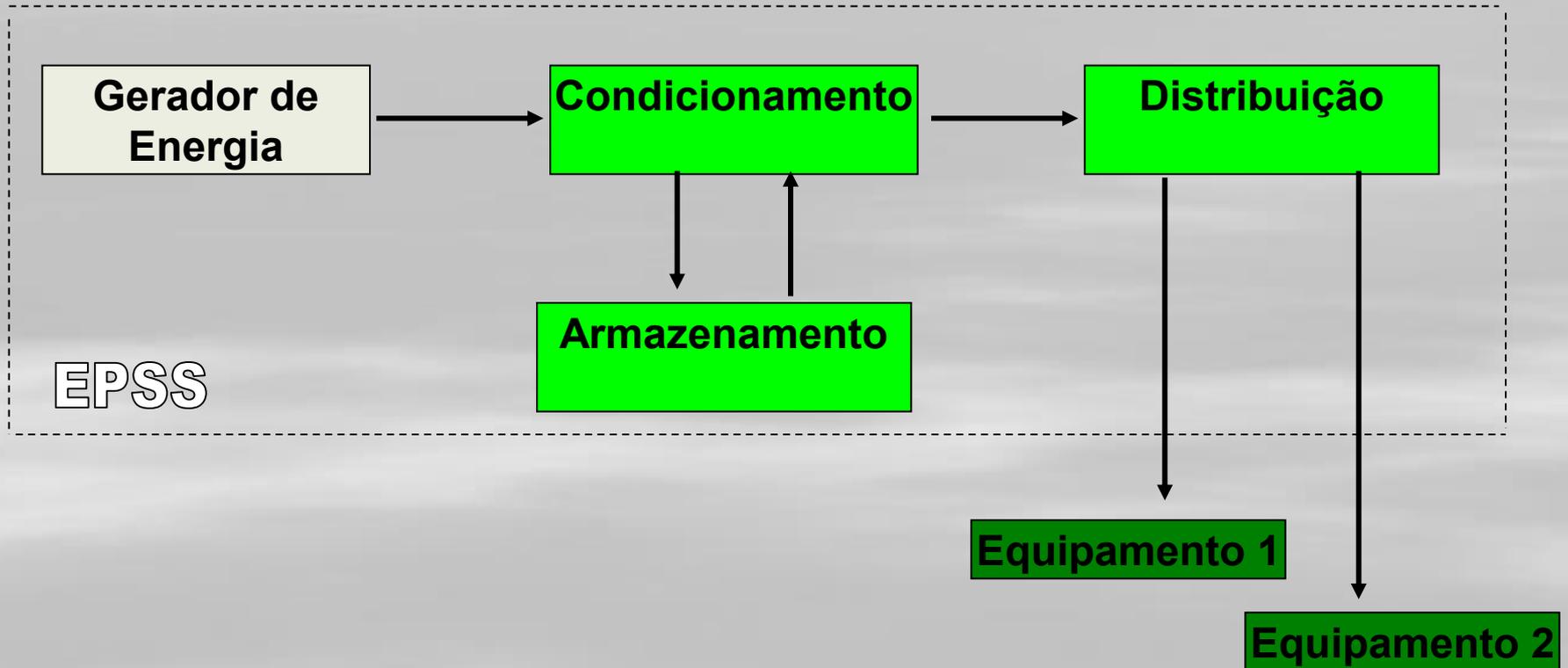
3 - Falha do foguete
4 - Sucesso, em operação

Suprimento de energia de satélites

Power Supply Subsystem - Subsistema de Suprimento de Energia

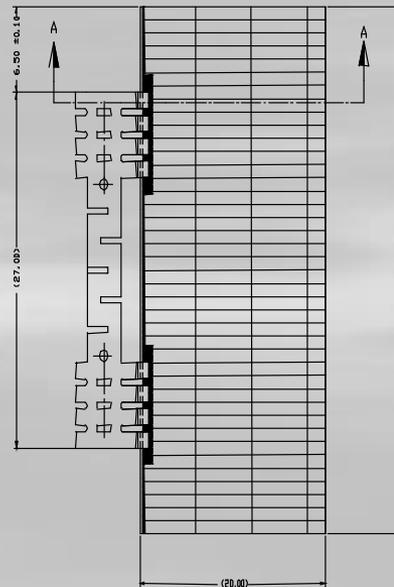
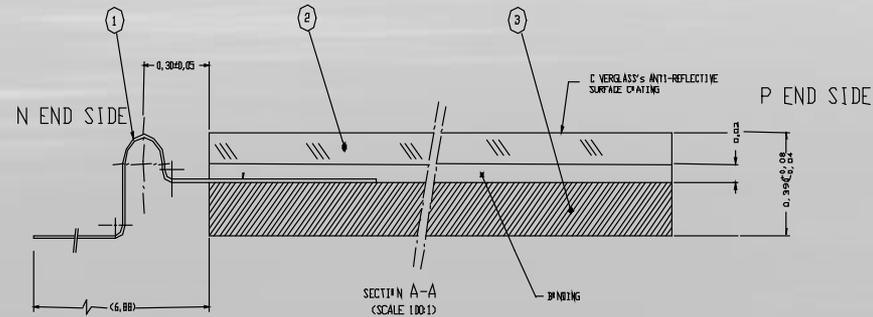
- Gerar potência elétrica;
- Condicionar a potência gerada;
- Armazenar energia;
- Prover potência em diferentes tensões;
- Distribuir, comutar e proteger a potência em diferentes linhas;
- Fornecer potência para disparo de dispositivos eletro-explosivos (pirotécnicos);
- Fornecer meios para diagnósticos e alteração de estados;
- Fornecer interface para alimentação e meios para ligar e desligar o satélite em solo.

Diagrama de Blocos do Subsistema de Suprimento de Energia



Outros Componentes básicos - "Solar Cell Assembly", SCA

1. Interconector"
2. "Coverglass"
3. Célula Solar de Silício



Componentes básicos - vidros (coberturas) de proteção

Cobertura de Vidro (“Coverglass”)

São lamínulas transparentes de vidro boro silicato, dopadas com Dióxido de Cério para evitar a formação de centros de cores.

As espessuras mais utilizadas variam de 50um a 500um.

Além disso são utilizadas para:

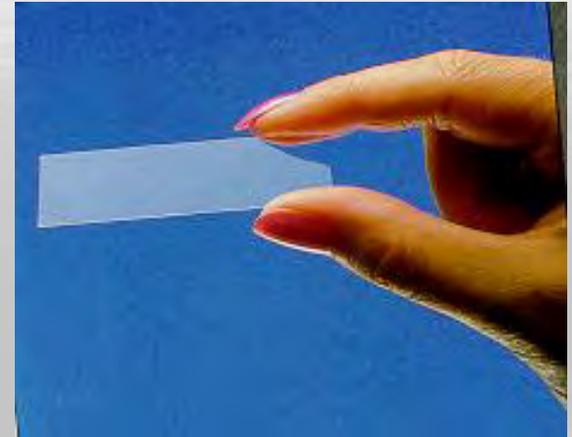
Proteger as células solares contra a radiação de partículas (prótons e elétrons) presentes no ambiente extraterrestre;

Proteger as células contra o oxigênio mono-atômico presente em órbitas baixas;

Filtrar a radiação ultra-violeta, a qual provoca a degradação do adesivo utilizado para a sua colagem na célula;

Minimizar as perdas por reflexão da radiação solar incidente;

Minimizar a absorbância e maximizar a emitância das células solares visando reduzir a temperatura de operação.



Outros componentes básicos do Gerador Solar Espacial

- **Cablagem de asa e conectores:** transferem potência e sinal do Gerador Solar para o satélite;

Potencia: energia da célula até o satélite;

Sinal: aterramento, temperatura, abertura;

- **Estrutura dos painéis** (*honeycomb*, *facesheet*, insertos);

- **Mecanismos de retenção e abertura** (dobradiças, pirotécnicos, molas, buchas);

- **Bapta ou Sada** – mecanismo de movimento com transferência de energia sem perda de contato elétrico;

- **Yoke** – interface mecânica entre o satélite e os painéis (evita sombra).

Projeto elétrico

Devem ser projetados para atender aos requisitos de potência estabelecidos através das especificações do subsistema de suprimento de energia do satélite.

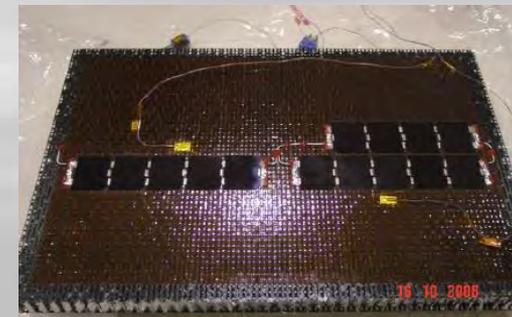
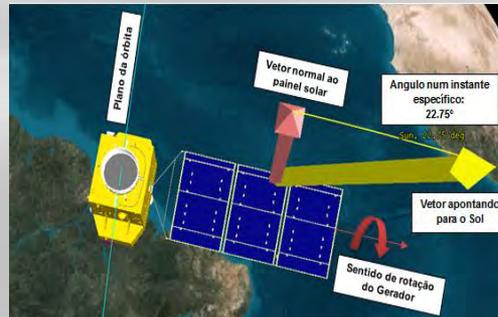
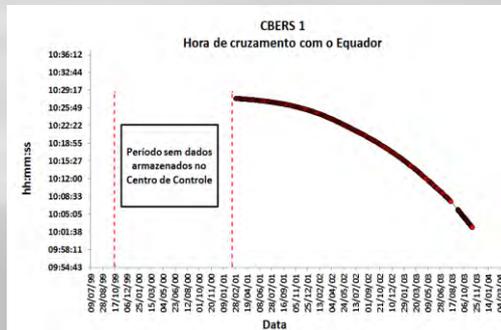
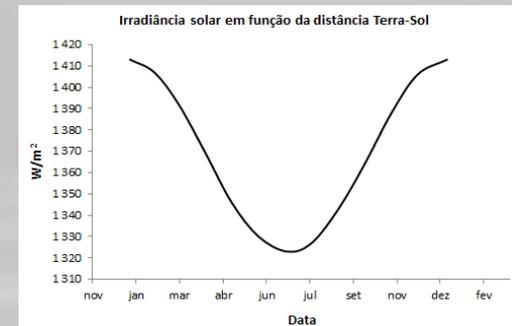
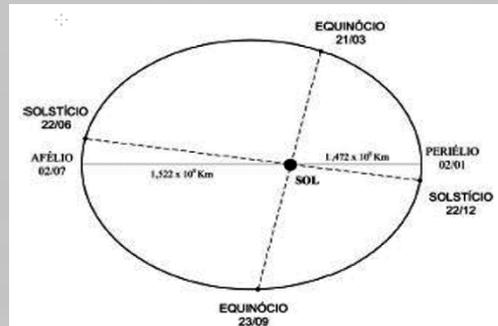
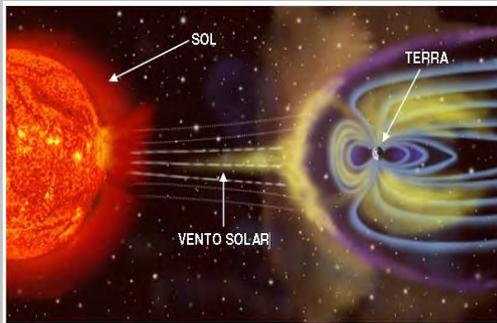
Requisitos Típicos:

- **Número de circuitos para carga das baterias;**
- **Número de circuitos para alimentação direta das cargas do satélite;**
- **Tensões de Operação;**
- **Potências no início de vida em condições padrões de teste (BOL, AM0, 25 °C);**
- **Potências no final da vida útil do satélite (EOL);**
- **Interfaces Elétricas;**
- **Momento Magnético Resultante;**
- **Confiabilidade;**
- **Massa.**

Projeto elétrico

Outras considerações para o projeto elétrico:

- Perdas por degradação da eficiência (radiação);
- Perdas por descasamento de células;
- Variação da distancia Terra-Sol;
- Variação da temperatura;
- Hora de cruzamento com o Equador.



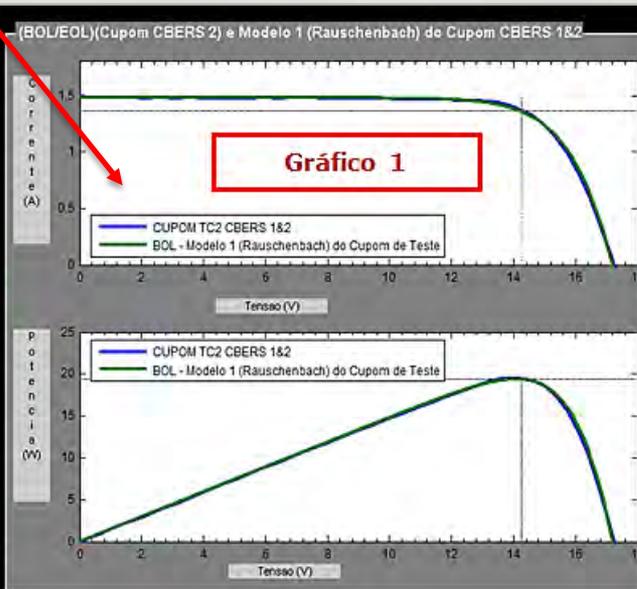
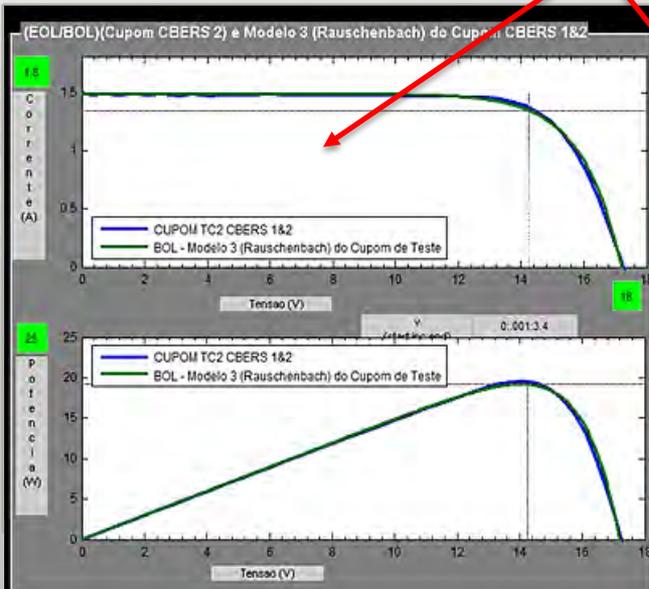
Projeto elétrico - rotina computacional

CUPOM CBERS2

Curvas IxV e PxV:
laboratório e modelos

Ajustes de TEMP.
e IRRAD.

Medidas elétricas
do cupom



Variar Temp. e Irradiância solar p/ cálculos

Temperatura (°C): 25
Irradiância (w/m²): 1367

Selec. BOL/EOL e click modelo p/ obter resultados

BOL

Parâmetros obtidos das curvas		Parâmetros obtidos das curvas	
Modelo 3 (Rauschenbach)	VOPcupom	Modelo 1 (Rauschenbach)	VOPcupom
Vcupommax: 14.07	14.25	Vcupommax: 14.1	14.25
Icupommax: 1.36628	1.34724	Icupommax: 1.37769	1.36192
Pcupommax: 19.2235	19.1982	Pcupommax: 19.4255	19.4073
ISC: 1.4899	VOC: 17.1989	ISC: 1.4899	VOC: 17.199
Fill Factor: 0.750195	Eficiência: 11.7188	Fill Factor: 0.758075	Eficiência: 11.8419

Dados CUPOM de Teste Obtidos Flash Test "Lapss"	
CUPOM CBERS 2	
V	I
1	-0.5610
2	-0.5610
3	-0.5610
4	-0.5610
5	-0.5610
6	-0.5610
7	-0.5610
8	-0.5610
9	-0.5420
10	-0.1060
11	0.3040
12	0.7550
13	1.1950
14	1.6600

Parâmetros da célula usada (dados do fabricante)

ISCO	VOCO	VMP0	IMP0	área cell cm ²
0.317	0.585	0.475	0.301	ε

Se alterar ISCO/VOCO ajuste a curva de novo

Degradação dos parâmetros

% ISCO	% VOCO	% VMP0	% IMP0	BOL = degrad. fabricação
6	2.00042	1.26316	9.21749	EOL = degrad. radiação, UV e Micrometeoritos

Parâmetros referência

AMD ref	Temp ref
1367	25

Parâmetros comuns "Modelos 1 e 3"

kVOC fator sol	kVMP fator sol	Resist série cell
0.245	0.107	0.040

Composição do CUPOM

N° cells série	N° strings
30	5

Parâmetros para "Modelo 1"

Resist. Shunt Cell	cte Boltzmann's	Carga elétron	cte ajuste curva (a)
300	1.38e-23	1.62e-19	1.37

Foram feitos ajustes nos parâmetros para a curva dos modelos ficarem idêntica ao resultado do flash test do cupom. Para o "Modelo 3" apenas ISC e VOC provocam alteração nas curvas.

Parâmetros de degradação das células e índices de variação com a temperatura

Degradação p/ radiação	Variação c/ a temp.	Ajuste de parâmetros	Mismatch /Sun calibration	Perdas Randômicas	UV e Micrometeoritos
EOL	EOL	EOL	EOL	EOL	EOL
jeISC	dISC1	p1eISC	p2eISC	p3eISC	p4eISC
-1	0.0000345	0.87	-1	-1	-1
jeVOC	dVOC	p1eVOC	p2eVOC	p3eVOC	p4eVOC
-1	-0.0021840	0.98	-1	-1	-1
jeIMP	dIMP1	p1eIMP	p2eIMP	p3eIMP	p4eIMP
-1	0.0000301	0.94	-1	-1	-1
jeVMP	dVMP	p1eVMP	p2eVMP	p3eVMP	p4eVMP
-1	-0.0022100	0.985	-1	-1	-1
jeBISC	dBISC1	p1bISC	p2bISC	p3bISC	p4bISC
-1	0.0000108	0.94	-1	-1	-1
jeBVOC	dBVOC	p1bVOC	p2bVOC	p3bVOC	p4bVOC
-1	-0.0022600	0.98	-1	-1	-1
jeBIMP	dBIMP1	p1bIMP	p2bIMP	p3bIMP	p4bIMP
-1	0.0000094	0.91	-1	-1	-1
jeBVMP	dBVMP	p1bVMP	p2bVMP	p3bVMP	p4bVMP
-1	-0.0023590	0.985	-1	-1	-1

Características das células e cupom

Projeto mecânico

O projeto mecânico da estrutura dos painéis solares, do yoke e dos mecanismos de abertura devem satisfazer a diversos requisitos tais como:

- Performance estrutural (dinâmica e estática);
- Confiabilidade;
- Acabamento superficial;
- Dimensionais;
- Massa;
- Interfaces elétricas;
- Interfaces Mecânicas;
- Interfaces Térmicas;
- Interfaces para controle de órbita e atitude;
- Compatibilidade eletromagnética;
- Ambientais (vácuo, degasagem de materiais, radiação, descargas elétricas, etc.)

Equipamentos de suporte

- ***Container for Solar Cell String Transportation;***
- ***Container for Solar Array Wing Transportation;***
- ***Solar Panel Visual Inspection Device;***
- ***Low Friction Deployment Rig;***
- ***Satellite Side Wall Simulator – SSS;***
- ***Stack Trolley (to hold SSS);***
- ***Data Acquisition System for Deployment Test;***
- ***Software for wing deployment analysis;***
(laboratory and orbit simulation condition);
- ***Sine Vibration Adapter;***
- ***Large Area Spot Light;***
- ***Panel Handling Devices;***
- ***Special Tooling for Repair Activities.***

Fabricação e testes



Térmico- vácuo



Transporte de módulos



Inspeção 15.000 células



Vibração senoidal

Fabricação e testes



Vácuo térmico

Matriz de testes

MODEL	ENGINEERING				QUALIFY		FLIGHT	
TEST	TC1	TC2	WH	EQSP	SM2	EQM	FM1	FM2
Sinusoidal Vibration					XX	XX		
Acoustic Vibration				XX	XX	XX	XX	XX
Thermal Vacuum	XX	XX		XX			XX	XX
Thermal Shock	XX	XX						
Vacuum Dry Friction (*)					XX	XX		
Electrical Insulation	XX	XX		XX		XX	XX	XX
Electrical Continuity	XX	XX	XX	XX			XX	XX
Resistance of Electrical Harness (*)			XX		XX	XX	XX	XX
Electrical Bonding and Grounding				XX		XX	XX	XX
Electrical Performance	XX	XX		XX			XX	XX
Function of Holddown/Release Mechanism					XX	XX		
Function of Deployment Mechanism					XX	XX		
Release and Deployment after Assembly					XX	XX	XX	XX
Release and Deployment after Acoustic					XX	XX	XX	XX
Release and Deployment after Sine Vib.					XX	XX		
Hinge Friction (*)					XX	XX		
Connecting Cable Torsion (*)			XX					
Conformance to Dimension and Mass (*)			XX	XX	XX	XX	XX	XX

(*) Test performed at component level

Transporte

Gerador Solar = 50kg; Container = 700kg



Seqüência de Lançamento do CBERS-2

CBERS-2 em Órbita



**Colocação em Órbita
Abertura do Painel Solar
(12min 29s)**



**Separação
2º/3º estágios
(4 min 48 s)**



**Liberção da Coifa
(2 min 55s)**



**Separação
1º/2º estágios
(2 min 35 s)**



**Manobra
(20 s)**



**Decolagem
(0 s)**



CBERS4

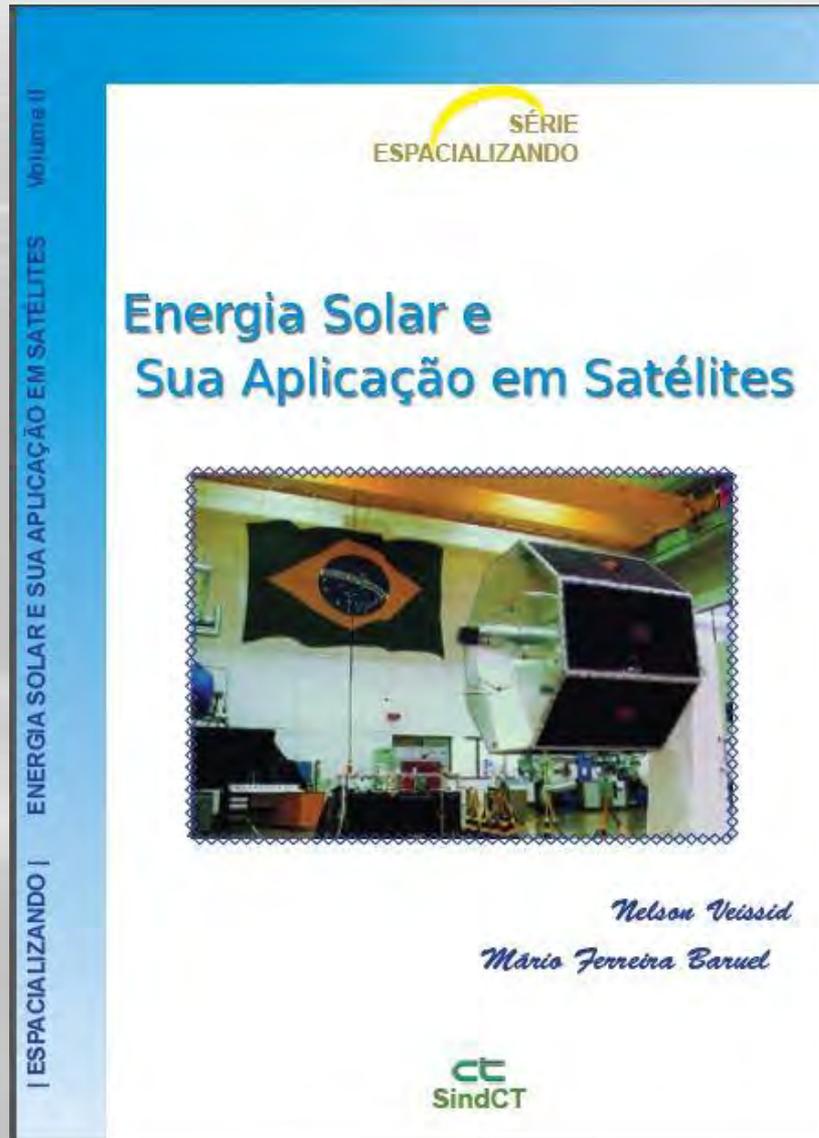
Lançamento, China, 07 Dez 2014



FILMES CBERS3 - Teste de abertura no LIT

- Modelo de engenharia
 - Modelo de voo

<http://www.sindct.org.br/files/celulassolares.pdf>



**Modelo de engenharia do
satélite SCD**



**DEA - Divisão de
Eletrônica
Aeroespacial**



**Visite a Sala de
Exposição
Permanente na DEA
12. 3208.6222**



Visão geral



Equipamentos de voo

**Geoprocessamento,
sensoriamento remoto,
coleta de dados**



**Pós-graduação, mestrado
doutorado**



**Observação da Terra e
Ciência do Sistema
Terrestre**



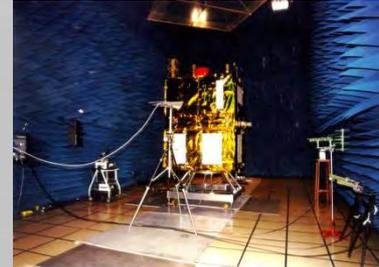
Amazônia



**Visite e
trabalhe no
INPE,
www.inpe.br**



**Ciências Espaciais e
Atmosféricas**



**Engenharia e Tecnologia
Espacial**



Astrofísica



**Previsão de Tempo e
Estudos Climáticos**



Antártica

FIM

Obrigado, perguntas?