

SÉRIE
ESPACIALIZANDO

Energia Solar e Sua Aplicação em Satélites



Nelson Veissid

Mário Ferreira Baruel



Energia Solar e Sua Aplicação em Satélites



SÉRIE
ESPACIALIZANDO

Energia Solar e Sua Aplicação em Satélites

Nelson Veissid
Mario Ferreira Baruel

São José dos Campos – SP

SindCT

2012

© 2012 by Nelson Veissid e Mario Ferreira Baruel
Diagramação: Fernanda Soares Andrade
Revisão: Virginia Finzetto

Ilustração Capa: cedida gentilmente pelo Instituto
Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

1ª Impressão, março de 2012.

Proibida a reprodução total ou parcial.

SindCT

Sindicato Nacional dos Servidores Públicos Federais
na Área de Ciência e Tecnologia do Setor Aeroespacial
R. Santa Clara, 432, Vila Ady Anna, São José dos Campos
São Paulo – Brasil – CEP: 12.243-630
www.sindct.org.br / imprensa@sindct.org.br

Dedicatória

Dedicamos este livro a todas as pessoas
que se interessam por ciências, como
curiosos ou como cientistas.

Conforme cita William Phillips, prêmio
Nobel de Física: “Ser cientista não dá
dinheiro. Se quiser ficar muito rico, vá
trabalhar com negócios ou direito. Por
outro lado, dá um prazer imenso para
quem é curioso e se interessa por saber
como as coisas funcionam.”

*Fonte: Folha de São Paulo, Caderno de
Ciências, 24 de novembro de 2011.*

Agradecimentos

*Agradecemos a todos aqueles que colaboraram
para a produção deste livro, em especial aos
amigos do INPE e à diretoria do SindCT.*

Sumário

Prefácio.....	11
1. O que é energia solar	13
2. Conversão da energia solar	17
2.1 Eficiências de conversão de energia.....	17
3. Efeito fotovoltaico	21
4. Tipos de células solares	25
4.1 Células solares de uso espacial.....	26
4.2 Células solares de uso terrestre.....	30
5. Medida de eficiência de conversão fotovoltaica e sua evolução	33
5.1 Tabela das melhores eficiências.....	35
6. Uso das células solares em satélite	37
6.1 Classificação e vida útil dos satélites.....	39
7. Outras aplicações com células solares.....	43
8. Conclusão	45
9. Referências bibliográficas	47

Prefácio

A SÉRIE ESPACIALIZANDO foi elaborada para levar à população, por meio de uma leitura simples e prazerosa, as diversas atividades desenvolvidas pelo Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – DCTA e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

Essas instituições, com sede em São José dos Campos – SP e sub-sedes em todo país, atuam na área de pesquisa e desenvolvimento em ciência e tecnologia aeroespacial.

O SindCT, por intermédio desta série, quer mostrar à sociedade que, mesmo sem perceber, utilizamos ciência e tecnologia espacial em nossas vidas diariamente.

Seja nosso convidado a descobrir esse mundo que está tão próximo de você.

Boa leitura!

Ivanil Elisiário Barbosa
Presidente do SindCT

Sérgio Rosim
*Secretário Geral do SindCT e
Organizador da Série*

1. O que é 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, de maneira homogênea, 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!

No entanto, não se pode esquecer que a natureza, principalmente a flora, em suas mais variadas formas vegetais, precisa de boa parte dessa energia para gerar e manter sua própria vida.

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. Veja na **Figura 1** a demonstração gráfica da distribuição da energia solar na superfície do globo terrestre.

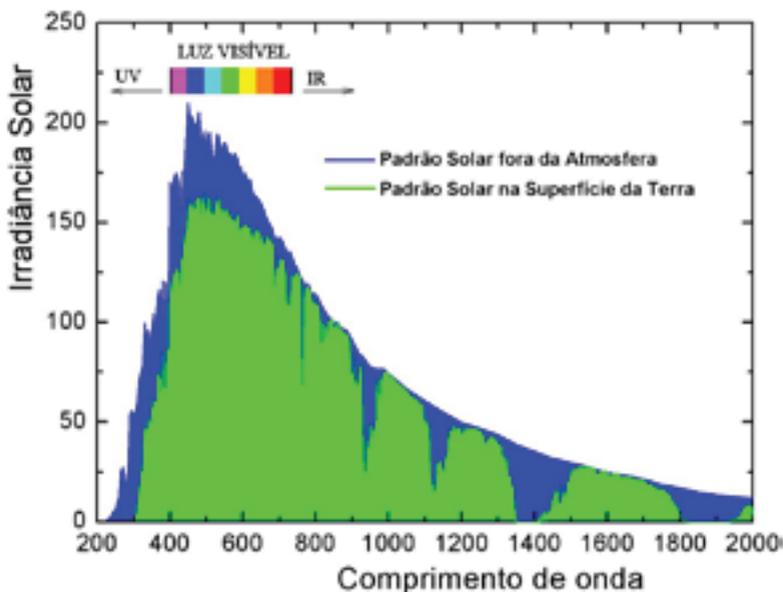


Figura 1: Distribuição da energia dos fótons provenientes do Sol que chega ao planeta Terra. A curva externa, a área azul, corresponde ao espectro fora da atmosfera; a curva interna, a área verde, é o espectro que chega à superfície da Terra em um dia claro, sem nuvens, por volta do meio-dia. (INPE)

A curva externa, a área azul da figura, corresponde ao espectro, ou aspecto da distribuição, encontrado fora da atmosfera terrestre e tem uma potência de 1.367 W/m^2 . A curva interna, a área verde da figura, tem uma potência de 1.000 W/m^2 (essa densidade de potência é equivalente a dez lâmpadas de 100 watts colocadas dentro de um quadrado de 1 metro por 1 metro).

A potência da área verde que aparece na figura (1.000 W/m^2) incide sobre a superfície da Terra com céu claro e sem nuvens. A área na figura indicada pela cor azul corresponde à intensidade luminosa que foi absorvida ou refletida pela atmosfera e é de, aproximadamente,

um terço da energia incidente no solo da Terra.

A irradiância solar no topo da atmosfera possui 6,3% de raios ultravioleta (UV), 44,9% de luz visível e 48,8% de raios infravermelhos (IR) em energia. Por outro lado, na superfície ao nível do mar, temos 3,2% de raios ultravioleta (UV), 49,1% de luz visível e 47,7% de raios infravermelhos (IR) em energia.

Raios UV e IR

A radiação ultravioleta (UV), ou raios ultravioleta, é a radiação eletromagnética com um comprimento de onda menor que a luz visível. O nome significa “mais alta que (além do) violeta”: o violeta é a cor visível com o mais curto comprimento de onda e a maior frequência.

A radiação infravermelha (IR), ou raios infravermelhos, é uma radiação na porção invisível do espectro eletromagnético, adjacente aos comprimentos de ondas longos, ou o final vermelho do espectro da luz visível. Ainda que não seja percebida na forma de luz, ela pode ser sentida como calor.

2. Conversão da 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.

2.1 Eficiências de conversão de energia

A eficiência de conversão de energia é uma característica inerente aos processos físicos e químicos que transformam uma forma de energia em outra. Vejamos alguns exemplos:

O motor elétrico recebe energia elétrica e gera energia mecânica com uma eficiência em torno de 80% e só perde para o chuveiro elétrico, que converte quase 100% de energia elétrica em energia térmica. Porém, não há grande mérito nisso, pois é um caminho natural converter a energia elétrica em energia térmica.

Uma lâmpada de filamentos que gera energia luminosa tem

eficiência de somente 15%. Já as lâmpadas fluorescentes são mais eficientes e, por isso, mais econômicas.

Exemplo bastante conhecido é o motor de carro, que converte a energia química do combustível em energia mecânica. Atualmente, sua eficiência de rendimento é de 35%, para um motor de gasolina/álcool bem regulado. Nos anos 1960, essa porcentagem era de 20% e, na década de 1980, de 30%. Atualmente, nos motores a diesel a eficiência de rendimento é de quase 50%.

O ideal em um processo de conversão de energia é que sua eficiência seja a maior possível, quanto mais próximo de 100%, melhor. Isso acontece quando a totalidade de determinada energia é transformada em outro tipo de energia sem nenhuma perda.

A evolução das “máquinas” de transformação de energia como motores elétricos, lâmpadas, geradores hidroelétricos, chuveiros elétricos, coletores solares e células solares depende do avanço da tecnologia. Ou seja, ela está atrelada a novas descobertas que acarretem em um aumento da eficiência de conversão de energia.

A **Figura 2** mostra um sistema residencial para aquecimento de água. A placa que absorve a radiação solar e a converte em aquecimento de água é chamada de coletor solar e tem uma eficiência de conversão em torno de 50%.



Figura 2: Sistema residencial de aquecimento de água por energia solar.
(Casa Solar Eficiente, CEPEL/Cresesb)

3. Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico é caracterizado pelo aparecimento de uma diferença de potencial (ddp). Ou seja, surge uma tensão elétrica, ou voltagem (V), quando um dispositivo é submetido a uma iluminação. Por exemplo, a **Figura 3** mostra essa característica, que é similar a de uma pilha.

Edmund Becquerel, em 1839, foi o primeiro cientista a perceber esse fenômeno físico. Desde então, os cientistas tinham conhecimento sobre a possibilidade de geração de energia elétrica através do efeito fotovoltaico. Os dispositivos de conversão de energia desse tipo sempre transformavam menos de 1% da energia solar em energia elétrica: uma eficiência de conversão muito baixa, que não justificava sua produção comercial. Por isso, até meados da década de 1950, experimentos nessa área eram apenas curiosidades de laboratório. Somente em 1954, com a publicação de um artigo científico por pesquisadores dos laboratórios Bell, relatando os passos tecnológicos para se conseguir uma célula solar com mais de 10% de eficiência, teve início a corrida para se conseguir células solares com eficiências cada vez maiores.

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 satélite Vanguard I, colocado em órbita em 1958.

Um material semiconductor com uma junção iluminada pode mostrar tensão elétrica e corrente elétrica nos terminais de maneira análoga a uma bateria química. Por exemplo, uma pilha comum tem voltagem de um volt e meio (1,5 V) e uma célula solar iluminada, feita com material de silício, tem meio volt (0,5 V). Os valores de tensão elétrica e de corrente elétrica são dependentes da carga colocada nos terminais, e existe um valor de carga ideal no qual o produto de tensão por corrente é máximo. A potência de saída (o produto desses dois) fornece a maior energia de conversão.

A física da célula solar pode ser entendida pela **Figura 3**. No exemplo, é mostrado o diagrama de uma célula solar com espessura de aproximadamente 0,3 mm.

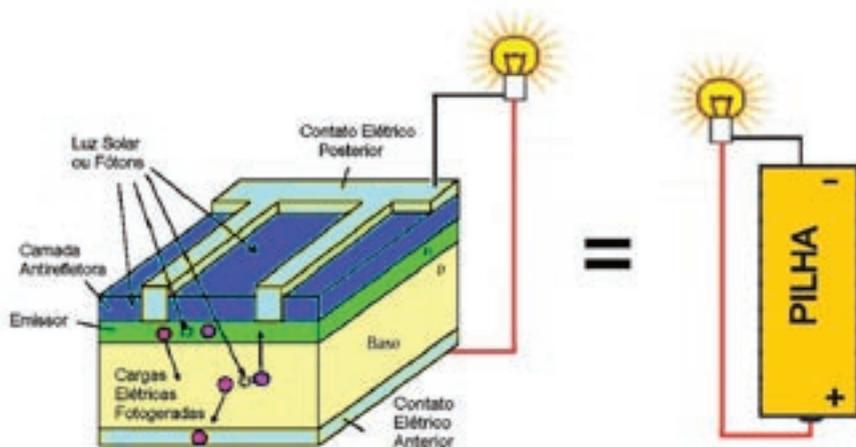


Figura 3: Diagrama de uma célula solar iluminada de junção e seu modo de operação semelhante ao de uma pilha.

A **Figura 3** mostra que quando os fótons penetram no material semiconductor são geradas cargas elétricas livres, que são separadas pelo campo elétrico entre a junção do semiconductor tipo p (base) e do semiconductor tipo n (emissor). Essas cargas chegam até os contatos metálicos e provocam uma tensão elétrica nos terminais positivo e negativo. Se um aparelho consumidor estiver ligado a esses terminais, existirá um fluxo de corrente elétrica através dos polos da célula solar. Deve-se observar que o contato elétrico posterior, sendo metálico, não é transparente à luz. Um óxido nessa superfície atua como uma camada antirrefletora (efeito contrário ao do espelho, que é refletor da luz). Esse processo diminui a perda de energia por refletividade na superfície da célula solar, pois os fótons refletidos que não penetram no material semiconductor representam uma perda de eficiência.

Resumindo, uma célula solar, quando iluminada, atua como se fosse uma pilha produzindo energia constante; enquanto uma pilha comum precisa ser substituída integralmente quando descarrega.

4. Tipos de células solares

As células solares podem ser classificadas quanto ao tipo de material, aplicações e outras características do processo de fabricação.

Os materiais semicondutores mais usados em sua fabricação são o silício (na forma monocristalina, policristalina ou amorfa), o arseneto de gálio, o telureto de cádmio e outros.

Células solares de uso espacial são utilizadas em áreas quadradas ou retangulares, de 2 x 2 cm até 4 x 6 cm, para garantir uma alta compactação da área efetiva, na montagem de painéis solares nos satélites, maior do que 97%.

Células solares de uso terrestre são de baixo custo, fabricadas com material e tecnologia que não agregam alto valor. O formato dessas células podem ser os mais variados possíveis, pois um painel solar de uso terrestre não necessita de alta compactação como os painéis de uso em satélite.

A **Figura 4** mostra alguns exemplos de células solares de uso espacial e de uso terrestre.

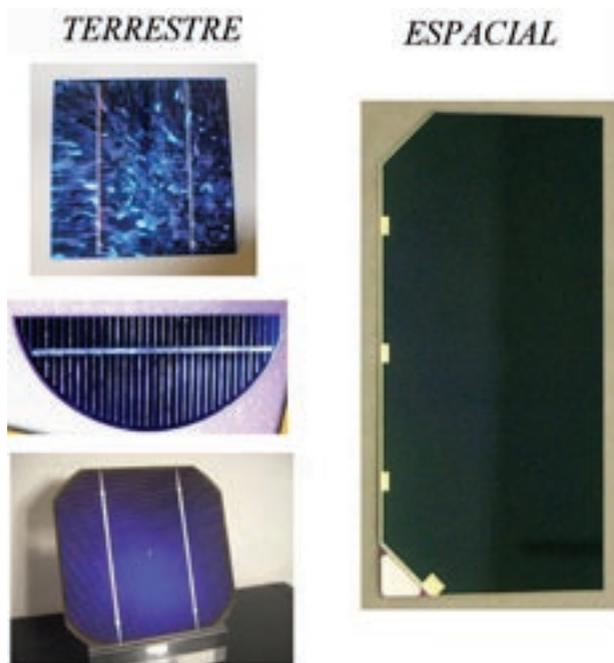


Figura 4: Células solares comerciais de uso espacial e de uso terrestre.

4.1 Células solares de uso espacial

Células solares para uso em satélites são dispositivos de alta confiabilidade, garantidos por testes severos feitos em condições extremas de temperatura, ciclos térmicos, vácuo, aceleração, choques mecânicos e radiação por partículas. A exigência desse nível de confiabilidade se justifica pelo fato de que os satélites em órbita em torno da Terra não podem ser consertados em caso de avaria. Os dois primeiros satélites brasileiros SCD1 e SCD2, colocados em órbita em fevereiro de 1993 e outubro de 1998, respectivamente, foram

abastecidos com células solares de silício. Devido à órbita baixa dos dois satélites, eles experimentam uma oscilação de temperatura de -40°C a $+40^{\circ}\text{C}$ a cada 100 minutos. Isso corresponde a um severo ciclo térmico.

Também são realizados em células solares testes de resistência à umidade (pois podem sofrer degradação por longos períodos de estocagem), compatibilidade eletromagnética, inspeção visual, medidas da característica corrente por tensão e ensaios de aderência da metalização e da camada antirrefletora. Painéis solares destinados a satélites são testados no Laboratório de Integração e Testes – LIT, do INPE, em São José dos Campos, que está preparado para executar os ensaios ambientais e funcionais necessários para qualificar equipamentos para uso em satélite (ver **Figura 5** e <http://www.lit.inpe.br/>).



Figura 5: Hall de testes de satélites do Laboratório de Integração e Testes – LIT/INPE, em São José dos Campos – SP.

Atualmente, os tipos de células solares de uso em satélites mais comuns são:

a) Células solares de silício monocristalino. São dispositivos resistentes e altamente confiáveis, do ponto de vista eletrônico e de resistência mecânica. Durante mais de 20 anos de uso em satélites, ficaram comprovadas essas qualidades. Seus pontos fracos são a média resistência à radiação e a média eficiência de conversão de energia (18%). O estágio tecnológico dessa célula solar já alcançou seu topo e quase não há mais pesquisas a serem feitas. Ao longo dos anos, várias melhorias foram incorporadas a essas células solares: junção rasa, material de silício de alta pureza (99,999999%), crescimento do monocristal por fusão lenta de camadas gerando pouquíssimos defeitos, espelho de alumínio na face anterior, campos elétricos adicionais e deposição metálica por feixe de elétrons, entre outras. Esses incrementos tecnológicos no dispositivo resultaram em um aumento da eficiência desse tipo de célula solar de 10%, na década de 1960, para quase 20%, nos dias atuais.

b) Células solares de três junções em série (chamada de tripla junção) com base de germânio. É um novo conceito na física desse dispositivo. Resolve o problema da perda de energia quando um fóton de energia maior do que a energia do semicondutor é absorvido pela célula solar de uma junção. Nas células solares de uma junção, esse excesso é uma perda de energia convertida em calor, e diminui a eficiência da célula solar. No entanto, nas células solares de tripla junção temos cada junção como uma “janela”, que absorve parte do espectro e deixa passar as restantes para as outras duas junções, como

mostrado na **Figura 6**. Dessa maneira, o espectro solar (ver **Figura 1**) é mais bem aproveitado, e a eficiência de conversão de energia é de 30 %. Células solares com mais de três junções estão sendo testadas em laboratório e, provavelmente, dentro de poucos anos serão comercializadas. A teoria prova que esse tipo de dispositivo com mais de vinte junções (tecnologicamente, muito distante) poderá ter eficiência de conversão superior a 50 %.

Esse segundo tipo de célula solar vem sendo cada vez mais utilizado em programas espaciais, apesar de seu custo ser muito superior ao das células solares convencionais de silício para uso em satélite. O programa sino-brasileiro de satélites CBERS colocou em órbita, em outubro de 1999, o primeiro satélite, o CBERS1; em outubro de 2003, o segundo satélite, o CBERS2; e, em setembro de 2007, o terceiro satélite, o CBERS2B. Todos eles com 15.000 células solares de silício que geravam 1.500 watts no começo de vida do satélite. O quarto satélite, o CBERS3, equipado com 10.000 células solares de tripla junção que gerarão 2.500 watts, tem data de lançamento prevista para 2012.

A **Figura 6** mostra o esquema de funcionamento de uma célula solar de tripla junção. A junção do topo absorve as luzes ultravioleta (UV), violeta, anil, azul e verde. A junção do meio absorve a luz amarela, laranja e vermelha e a junção da base absorve a radiação infravermelha (IR). O topo é feito com material semicondutor de liga gálio-índio-fósforo (GaInP), o meio é feito com material semicondutor de liga gálio-arsênio (GaAs) e a base é feita de germânio (Ge).

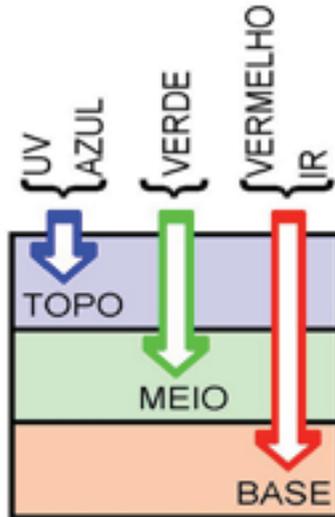


Figura 6: Diagrama esquemático de absorção luminosa de uma célula solar de três junções

4.2 Células solares de uso terrestre

Células solares de uso terrestre são dispositivos de baixo custo, porém devem ter eficiência superior a 10%. Para compensar os demais custos com projeto, instalação, manutenção e custos dos sistemas periféricos, a célula solar precisa ter essa eficiência mínima.

As células solares desse tipo para uso comercial mais comum são as de silício monocristalino, as de silício policristalino, as de silício amorfo e as de filme fino como cobre, índio, gálio e selênio (CIGS) e a de telureto de cádmio (CdTe). Esta última, a de CdTe, tem uma história de pesquisa tão antiga quanto as células solares de silício, porém seu desenvolvimento não evoluiu de maneira satisfatória, devido principalmente à dificuldade de se obter um material semiconductor de

boa qualidade. A célula solar de CdTe é considerada de médio custo e o seu processo de fabricação envolve tecnologias relativamente simples. Atualmente, dispositivos de CdTe alcançam eficiência de 16%, mas só em áreas menores que 1 cm². Porém, a tecnologia desse tipo de célula solar tem potencial para evoluir e ela ainda poderá ser amplamente utilizada.

Outro ponto interessante da evolução das células solares são as células emergentes. Células solares orgânicas fabricadas com plástico flexível transparente poderão ser aplicadas em qualquer tipo de superfície (vidraças, telhados, paredes etc.). Elas possuem baixo custo, mas até agora sua eficiência chega somente a 4%. Essas células são fabricadas com os elementos químicos rutênio e titânio, ou nanopartículas (partículas com dimensão de um milionésimo de mm) de óxido de zinco. Também são conhecidas como *Dye-Sensitized Solar Cell – DSSC* ou sensibilizada por corante. Pesquisas recentes feitas com esses tipos de células solares caminham em direção ao uso de corantes naturais como, por exemplo, os corantes de açaí e de jabuticaba.

5. Medida de eficiência de conversão fotovoltaica e sua evolução

A eficiência de uma célula solar é medida em laboratórios de pesquisa e centros de produção, pois caracteriza o estado da arte dos processos usados na fabricação. Esse índice é obtido por meio da curva experimental de corrente elétrica por tensão obtida com a célula solar em condições específicas: iluminação padrão definida na norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e à temperatura de 25°C.

Os equipamentos de medida de eficiência de conversão fotovoltaica são o simulador solar (que reproduz em laboratório a luz solar natural) e um sistema de medida elétrica de tensão e de corrente elétrica no dispositivo.

O Grupo de Células Solares do Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS/INPE, em São José dos Campos, executa essa medida para satisfazer às exigências dos programas de satélites brasileiros e, também, como serviço à comunidade para interessados externos (estudantes e pesquisadores de outros institutos e empresas).

Pela curva de corrente por tensão, conhecida como característica $I \times V$, é possível extrair várias informações a respeito dos processos físicos do funcionamento e do estado da arte da fabricação da célula solar. Os pesquisadores do LAS/INPE têm publicado artigos em revistas internacionais e apresentado em congressos da área dezenas de trabalhos sobre esse tipo de pesquisa fundamental.

Deve-se ressaltar que uma boa medida da característica de uma

célula solar iluminada depende crucialmente da fonte de luz usada, ou seja, depende do simulador solar. Em função disso, o LAS/INPE desenvolveu um projeto financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP chamado de Simulador Solar de Baixo Custo – SOLSIM. A tecnologia desse equipamento foi patenteada e repassada para a Orbital Eng. Ltda., que já produziu e comercializou vários desses sistemas. A **Figura 7** mostra a foto do SOLSIM.



Figura 7: Primeiro simulador solar desenvolvido e comercializado no Brasil (SOLSIM). Projetado em parceria pelo INPE/Orbital e comercializado pela empresa Orbital Eng. Ltda., sediada em São José dos Campos, SP.

5.1 Tabela das melhores eficiências

Para uma determinada célula solar entrar na lista de melhor eficiência, ela deve ter sido caracterizada por laboratórios credenciados internacionalmente. Os dois principais institutos que fazem e divulgam o estudo da corrida de eficiência de células solares são o *National Research Energy Laboratory – NREL*, nos Estados Unidos, e o Instituto Fraunhofer, na cidade de Freiburg, na Alemanha.

O LAS/INPE já fabricou células solares de silício com junção profunda (apenas em nível de laboratório, não em produção industrial), como resultado de um trabalho acadêmico de mestrado apresentado em 1998, e entrou em sétimo lugar na classificação internacional da carta do Instituto Fraunhofer.

Outro marco importante realizado pelo Grupo de Células Solares desse laboratório foi o projeto, desenvolvimento, fabricação e testes de lotes de células solares de silício de qualificação espacial para uso nos experimentos que estão a bordo dos satélites brasileiros SCD1 e SCD2. Esses experimentos estão confirmando em missão a boa qualidade dos dispositivos brasileiros.

6. Uso das células solares em satélite

O primeiro satélite alimentado a energia solar foi o norte-americano Vanguard I, lançado em 1958. O seu sistema energético produzia 0,1 watt e funcionou durante 8 anos. Os outros foram o satélite Explorer III e o satélite russo Sputnik 3. Telstar, lançado em 1962, foi o primeiro satélite comercial de telecomunicações com 14 W de potência alimentado por células solares.

Esses exemplos de satélites serviram para estabelecer a confiabilidade do uso de células solares em órbita. Atualmente, a maioria dos satélites em órbita em torno da Terra tem painéis solares gerando vários milhares de watts de potência.

Painéis solares compostos por células solares estão localizados nas partes externas dos satélites. Os painéis podem estar juntos ao corpo do satélite ou abertos e orientados para o Sol. **A Figura 8** mostra dois satélites brasileiros (os painéis solares são de cor azulada).

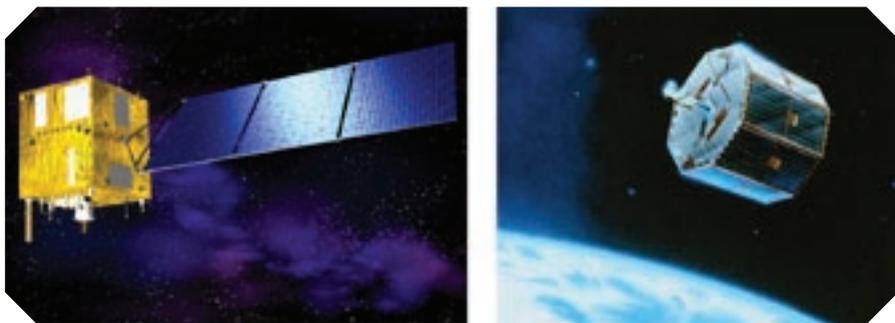


Figura 8: O satélite brasileiro *Satélite de Coleta de Dados Meteorológicos – SCD*, à direita, e o satélite sino-brasileiro *China Brazil Earth Resources Satellite – CBERS*, à esquerda. (INPE)

O projeto da parte de suprimento de energia elétrica de um satélite depende do gasto de energia dos componentes eletrônicos, tais como os resistores e diodos, que formam os diversos subsistemas (telecomunicações, computador de bordo, controle de atitude e controle térmico). Cada célula solar gera uma pequena quantidade de energia elétrica. O projeto correto calcula a quantidade de células solares necessárias para que o gerador solar forneça a energia requerida pelo satélite.

Os primeiros satélites brasileiros SCD1 e SCD2 têm, cada um, três mil células solares de 2,5 cm x 6,2 cm, que geram uma potência elétrica de 110 W. Elas alimentam baterias de NiCd de 8Ah. Vários conjuntos de células solares são ligadas em série (chamados de cadeia) e em paralelo (módulos) para produzir a tensão do barramento de 18 volts, pois cada célula possui uma tensão de apenas 0,5 volts.

6.1 Classificação e vida útil dos satélites

Os satélites artificiais são classificados segundo a órbita (trajetória) que descrevem em volta da Terra, pela massa e pela finalidade. São exemplos os satélites geoestacionários de órbita alta, os telescópios espaciais, os de sensoriamento remoto, meteorológicos, GPS e militares.

A altitude da órbita e as características do satélite (massa, orientação por spin ou três eixos e outras) estabelecem o ciclo de temperatura de operação. Os satélites brasileiros de coleta de dados SCDs enfrentam uma variação de temperatura de -40°C a $+40^{\circ}\text{C}$ a cada volta em torno da Terra (o satélite percorre essa volta em 100 minutos).

O satélite sino-brasileiro CBERS tem os painéis solares voltados constantemente para o Sol, em um sistema de controle de três eixos. Devido a esses fatores, sua temperatura de operação varia entre -80°C a $+80^{\circ}\text{C}$. A **Figura 9** mostra a realização de uma inspeção visual e reparos técnicos no modelo de voo do CBERS2, realizado no Laboratório de Integração e Testes – LIT/INPE.



Figura 9: Serviço de reparo no painel solar do Satélite CBERS realizado no LIT/INPE.

Na superfície da Terra, um painel solar suporta as intempéries da natureza (chuva, vento, variação de temperatura, granizo e outros fatores). Um painel solar colocado em um satélite, no entanto, sofre outro tipo de degradação ambiental. No espaço, as condições ambientais são diferentes, porque, fora da atmosfera da Terra, temos um fluxo de partículas ionizantes (elétrons e prótons de alta energia), ciclos térmicos mais severos, micrometeoritos, eletricidade estática e outros fatores. Todos esses efeitos combinados produzem degradação das células solares, ocasionando uma diminuição da sua eficiência de conversão.

Em um projeto de satélite, após definido seu tempo de vida útil (por exemplo, dois anos), é calculada por estimativa qual seria a eficiência da célula solar após esse período: eficiência de fim de vida, ou *End of Life – EOL*. O projeto do painel solar usa esse valor de eficiência para o cálculo da área necessária de painéis que irá gerar uma determinada potência. Dessa maneira, a área calculada deve “caber” no satélite, caso contrário o projeto de suprimento de energia deverá ser refeito. O valor de eficiência no começo de vida do satélite ou *Begin of Life – BOL* mostra que existe excesso de energia. Essa sobra de energia é perdida na forma de calor ou, raramente, é usada para alimentar subsistemas, ou experimentos passíveis de serem desligados, sem comprometer o funcionamento do satélite.

A vida útil de um satélite é muitas vezes subestimada. Em função disso, vários satélites continuam operacionais por períodos maiores do que os planejados. Quando o fluxo esperado de bombardeamento

por partículas ionizantes é menor do que o estimado, a vida do satélite se prolonga. Para exemplificar, os primeiros satélites brasileiros (SCD1 e SCD2) tinham uma expectativa de vida de 1 ano e 2 anos, respectivamente. O SCD1 foi lançado em fevereiro de 1993 e o SCD2, em outubro de 1998 e, até o momento, ambos ainda estão operando.

7. Outras aplicações com células solares

A célula solar é um dispositivo de microeletrônica otimizado para obter o máximo de conversão de energia solar em energia elétrica. Também é usado como sensor de radiação, devido à sua peculiar característica de ter a corrente de curto circuito, que é a corrente elétrica que passa nos terminais da célula solar iluminada com uma resistência de carga muito baixa, proporcional à intensidade luminosa.

O radiômetro (medidor de radiação solar) baseado em célula solar é largamente usado em estações meteorológicas por ter um baixo custo e uma rápida resposta elétrica. O LAS/INPE pesquisa e desenvolve a tecnologia de produção desse tipo de radiômetro. Essa tecnologia também foi repassada para a empresa Orbital Eng. Ltda., de São José dos Campos, SP, que atualmente comercializa esses radiômetros.

Outra aplicação interessante do uso de células solares é o Experimento Célula Solar colocado a bordo do segundo Satélite Brasileiro de Coleta de Dados, o SCD2 (ver **Figura 8**). O objetivo desse experimento é qualificar em missão espacial células solares de silício do tipo convencional, produzidas no Brasil para uso em satélites. A análise dos dados transmitidos pela antena do satélite SCD2 em tempo real mostrou sua aplicabilidade em áreas da meteorologia, sensoriamento remoto e climatologia.

Esse estudo é um subproduto do objetivo principal do experimento e foi descoberto após a colocação em órbita do SCD2. Pois, durante a análise dos primeiros registros, foi verificado que a célula solar do

experimento também tinha a capacidade de medir a radiação solar que é refletida pelo planeta Terra para o espaço exterior. Essa radiação refletida, conhecida como albedo planetário, é um tipo de “monitor” do planeta. Sua variação sazonal (mensal e anual) e sua variação local (latitude e longitude) permitem estimar o efeito de acontecimentos naturais como erupção vulcânica, El-Niño e outros fatores climáticos e o de interferência humana como desmatamentos, poluição e outros na “saúde” do planeta.

A **Figura 10** mostra a imagem dos valores da média do albedo planetário no mês de fevereiro de 2000 sobre a América do Sul, obtida com a análise dos dados do Experimento Célula Solar nesse período. O site www.las.inpe.br/~veissid (do autor deste livro) mostra mais imagens referentes ao assunto e os trabalhos decorrentes desse estudo.

Como um exemplo, a **Figura 10** mostra a nebulosidade persistente da Floresta Amazônica, que tem alto valor de refletividade. Em azul, aparecem os valores baixos da refletividade dos oceanos Atlântico e Pacífico.

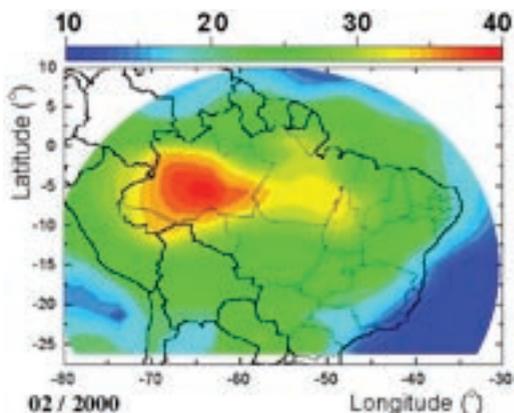


Figura 10: Imagem do valor médio do albedo planetário no mês de fevereiro de 2000, obtido pelo Experimento de Célula Solar do satélite brasileiro SCD2, do INPE. A barra de cores mostra a refletividade média do sistema superfície da Terra mais atmosfera, variando de 10 % (azul) a 40 % (vermelho).

8. Conclusão

“O crescimento das energias renováveis eólica e solar dobra a cada dois e três anos, respectivamente. Se o uso dessas energias renováveis crescerem mais depressa do que a Economia, as emissões de carbono para a atmosfera cairão e o aquecimento global diminuirá (*Scientific American*, Edição Especial Brasil, ano 4, nº 41, outubro de 2005, p. 74).”

Apenas o fato de se preservar o meio ambiente já seria uma boa justificativa para a importância das pesquisas com células solares. Soma-se a isso o uso desse valioso dispositivo também em satélites. Portanto, temos a convicção de que o efeito fotovoltaico ainda irá permanecer durante muitos anos como uma alternativa do uso de energia ecologicamente correto.

No Brasil, especialistas de Universidades e Institutos de Pesquisas têm sido convocados pelos Ministérios da Ciência e Tecnologia, Ministério do Meio Ambiente, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão e outras instâncias governamentais com o objetivo de alavancar o uso da energia solar. Os especialistas chegam à conclusão que é preciso esclarecer a opinião pública sobre as vantagens do uso da energia solar, além de disseminar as informações, desburocratizar os processos de fomento às pesquisas, diminuir impostos sobre os projetos que envolvem a utilização de energia solar e criar leis que favoreçam a sua aplicação (<http://www.cgee.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=6392>).

9. Referências bibliográficas

CHAPLIN, D. M.; FULLER, C. S.; PEARSON, G. L. (1954). *A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power*. Journal of Applied Physics, v. 25, p. 676.

RAUSCHENBACH, H. S. (1980). *Solar cell array design handbook*. New York: Van Nostrand Reinhold Comp.

VEISSID, N.; NUBILE, P.; BELOTO, A. F.; ANDRADE, A. M. de. (1990). *The Solar Cell Experiment of the First Brazilian Complete Space Mission Satellite*. In: TWENTY-FIRST SPECIALISTS PHOTOVOLTAIC CONFERENCE, Kissimmie, Florida, USA.

VEISSID, N.; PEREIRA, E. B. (2000). *Um modelo simples de levantamento do albedo planetário empregando dados do experimento célula solar do satélite brasileiro SCD2*. Brazilian Journal of Geophysics, v.18, n.1, p. 25.

VEISSID, N. (2003). *New satellite sensor and method for the direct measurement of the planetary albedo: Results for the 1999, 2000 and 2001 in South America*. Atmospheric Research, v. 66, p. 65.

VEISSID, N. *Logarithmic distribution of planetary albedo on South America: A new tool for monitoring climate changing*. In: DIAS, P. L. da S.; RIBEIRO, W. C.; SANT'ANNA, J. L. Neto.; ZULLO, J. Junior. Public policy, mitigation and adaptation to climate change in South America. Editora Instituto de Estudos Avançados – IEA/USP, 2009, p. 249-265. Downloading em <http://www.ica.usp.br/cienciasambientais/>.

SindCT

**Sindicato Nacional dos Servidores Públicos Federais na
Área de Ciência e Tecnologia do Setor Aeroespacial**

Diretoria SindCT Triênio 2011 – 2014:

Presidente: Ivanil Elisário Barbosa

Vice-Presidente: Fernando Morais Santos

Secretário Administrativo: Sérgio Rosim

1º Secretário de Finanças: Luis Elias Barbosa

2º Secretário de Finanças: Geraldo Orlando Mendes

Secretário Jurídico e de Saúde do Trabalhador: Mário Afonso R. do Canto

Secretário de Aposentados: José Aílson Rosa

Secretário de Comunicação e Cultura: Vítor Antonio Portezani

Secretário de Formação Sindical: Gino Genaro

Suplente: Laís Maria Resende Mallaco

Suplente: Alison de Oliveira Moraes

Conselho Fiscal: Neusa Maria do Carmo

Conselho Fiscal: Luiz Fernando Figueiredo Bernabe

Conselho Fiscal: Edmilson Ribeiro da Silva

Suplente do Conselho Fiscal: Myrian Curci Borçato

CT
SindCT

Rua Santa Clara, 432, Vila Adyanna, São José dos Campos, SP
www.sindct.org.br

A SÉRIE ESPACIALIZANDO, idealizada e produzida pelo SindCT, traz neste volume “Energia Solar e Sua Aplicação em Satélites”. Neste livro, os autores descrevem as características da Energia Solar e o seu aproveitamento como energia alternativa limpa. Também, apresentam o uso da tecnologia fotovoltaica ou tecnologia de células solares como um sistema gerador de energia elétrica que mantém ativo os satélites artificiais colocados em órbita em torno da Terra.

O livro trata da evolução tecnológica de novos dispositivos e o aumento da eficiência de conversão de energia ao longo dessa evolução. Existem amplas possibilidades de pesquisa e de utilização de células solares, desde aplicações terrestres até espaciais, e o Laboratório de Energia Solar do INPE vem contribuindo com trabalhos de alto nível nessas áreas desde 1980.



Nelson Veissid é bacharelado em Física, mestre em Física e doutor em Engenharia Elétrica na área de Física de Dispositivos Semicondutores pela Universidade de São Paulo. Pesquisador no Laboratório de Sensores e Materiais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, em São José dos Campos, SP. Sua principal atividade é pesquisar novos métodos de caracterização elétrica e óptica em células solares e dispositivos fotovoltaicos. Também ministra cursos de pós-graduação e cursos de curta duração na área de Energia Solar. Autor de vários artigos científicos com participações em congressos nacionais e internacionais e coordenador do Comitê Científico dos Congressos Brasileiros de Energia Solar.

Mario Ferreira Baruel é engenheiro eletrônico, formado pela Fundação Valeparaibana de Ensino, em 1989, e mestre em Engenharia e Tecnologia Espaciais pelo INPE. Trabalha no INPE como tecnologista desde 1978, na área de Geradores Solares para Satélites. Ministra cursos de engenharia aeroespacial e de eletrônica.