



## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

## ÍNDICE

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Momentos históricos</b>                       | <b>4-2</b>  |
| <b>O efeito fotovoltaico</b>                     | <b>4-4</b>  |
| <b>As tecnologias</b>                            | <b>4-7</b>  |
| <b>As aplicações</b>                             | <b>4-10</b> |
| <b>Plataformas de energias renováveis</b>        | <b>4-17</b> |
| <b>Energia fotovoltaica no espaço ... hoje !</b> | <b>4-19</b> |
| <b>Actividades didácticas</b>                    | <b>4-20</b> |
| <b>Para saber mais ...</b>                       | <b>4-22</b> |



## 4

### Conversão Fotovoltaica da Energia Solar Momentos históricos ...

1839 **Edmund Becquerel**, físico experimental francês, descobriu o efeito fotovoltaico num electrólito.

1873 **Willoughby Smith** descobriu o efeito fotovoltaico num material semi-conductor, o **Selénio**.

1876 **Adams e Day** detectam igualmente o fenómeno no **Selénio** e constroem a primeira célula fotovoltaica com rendimento estimado de 1% (!)

1883 **Charles Fritts**, um inventor americano, descreveu as primeiras células solares construídas a partir de camadas – “wafers” - de **Selénio**.

1887 **Heinrich Hertz** descobriu que a influência da radiação ultravioleta na descarga eléctrica que provoca uma faísca entre dois eléctrodos do metal.

1904 **Hallwachs** descobriu que uma combinação de metais eram sensíveis à luz.

1914 Nesta altura já se conhecia a existência de uma barreira de potencial em dispositivos fotovoltaicos.

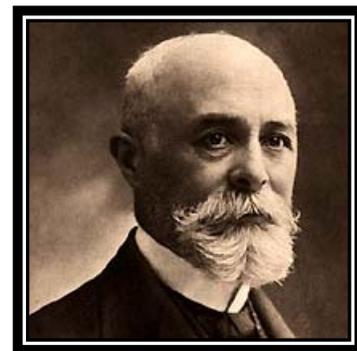
1916 **Millikan** forneceu a prova experimental do efeito fotoeléctrico.

1918 O cientista polaco **Czochralski** desenvolveu um processo de crescimento de cristais de **Silício (Si)** a partir de um único cristal.

1923 **Albert Einstein** recebeu o **prémio Nobel** pelos trabalhos do **efeito fotoeléctrico**

1940/50 Desenvolve-se o **método Czochralski** para obtenção de **Si** de elevado grau de pureza, sob a forma de lingote **monocristalino**, para fins industriais.

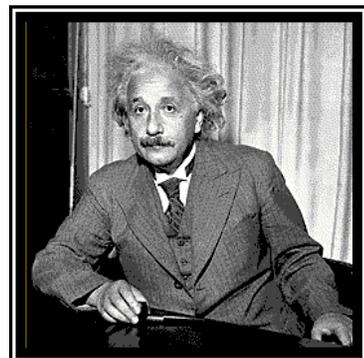
1951 O desenvolvimento de uma **junção n-p** permitiu a produção de células a partir de um único-cristal de **Germânio (Ge)**.



Edmund Becquerel [1820-1891]



William Adams [1836-1915]



Albert Einstein [1879-1955]



## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

## Momentos históricos ... (2)

**1954** Realização prática da primeira célula solar de **Si monocristalino** (Pearson, Fuller, Chapin). Descoberta do efeito fotovoltaico no **Arsenieto de Gálio (GaAs)**, por Welker, e em cristais de **Sulfureto de Cádmio (CdS)**, por Reynolds e Leies.

**1956** Primeiras *aplicações terrestres* da conversão fotovoltaica (luzes de flash, bóias de navegação, telecomunicações).

**1958** Primeiras *aplicações espaciais* - satélite VANGUARD-1 – que continuaram com o satélite EXPLORER-6, a nave espacial NIMBUS (1964) com um sistema de 470 Wp, o observatório ORBITING (1966) com 1 kWp e o satélite OVI-13 (1968), lançado com dois painéis de **CdS**.

**1959** Realização das primeiras células de **Si multicristalino**.

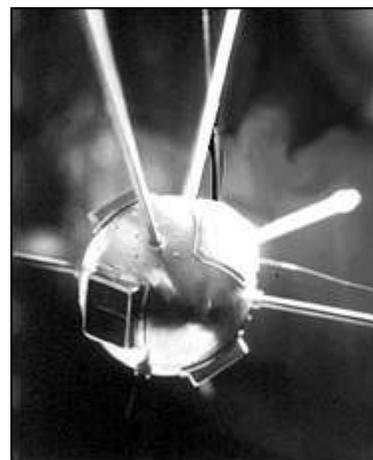
**1963** No Japão, foi instalado num farol, um sistema com 242 Wp fotovoltaicos (a maior do mundo desse tempo).

**1972** Com tecnologia de células **CdS**, foi instalado pela França, na cidade de Niger, um sistema que alimentava uma televisão difundindo a Tele-escola.

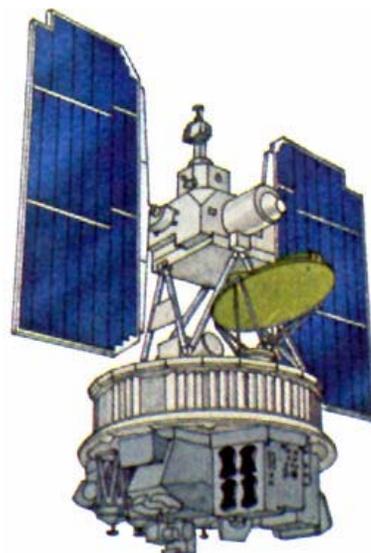
**1976** Fabrico das 1<sup>as</sup> células de **Si amorfo** (Carlson e Wronski da RCA).

**1981- 83** Foram instalados sistemas de demonstração, vocacionados para aplicações de electrificação de edifícios, produção de água potável, etc.

**1982** A produção mundial fotovoltaica ultrapassou 9,3 MW e, desde então não tem parado de crescer ....



Satélite VANGUARD-1 (1958)



Nave espacial NIMBUS (1964)



## 4

### Conversão Fotovoltaica da Energia Solar O efeito fotovoltaico (1)

Para compreender melhor o funcionamento da célula fotovoltaica, devemos entender o conceito de eficiência da conversão - quociente entre a irradiação solar que incide na área da célula e a energia eléctrica que é produzida. Melhorando a eficiência da célula fotovoltaica, corresponde a afirmar que os sistemas fotovoltaicos podem tornar-se cada vez mais competitivos relativamente à produção de energia eléctrica com combustíveis fósseis.

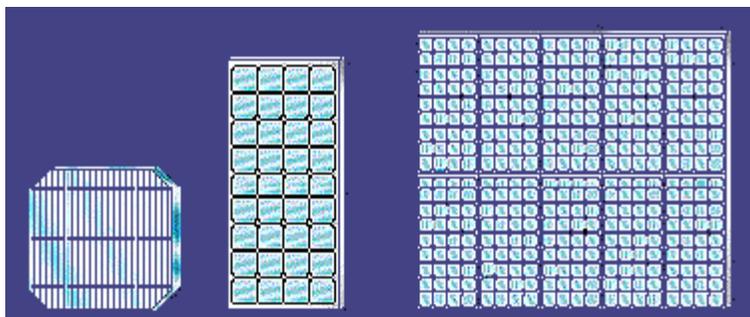


As células fotovoltaicas convertem a irradiação solar em electricidade a partir de processos que se desenvolvem ao nível atômico nos materiais de que são constituídas. A verdadeira compreensão deste fenómeno, levou cerca de cem anos a esclarecer, embora o processo de produzir corrente eléctrica em meio contínuo tenha sido relatado desde 1839.

Célula

Módulo

Instalação



Durante a segunda metade do séc. XX assistiu-se à sucessiva ultrapassagem dos principais problemas de fabrico, de um aumento de eficiência, de tal forma que o custo deste tipo de sistema - de produção alternativa de energia - reduziu significativamente

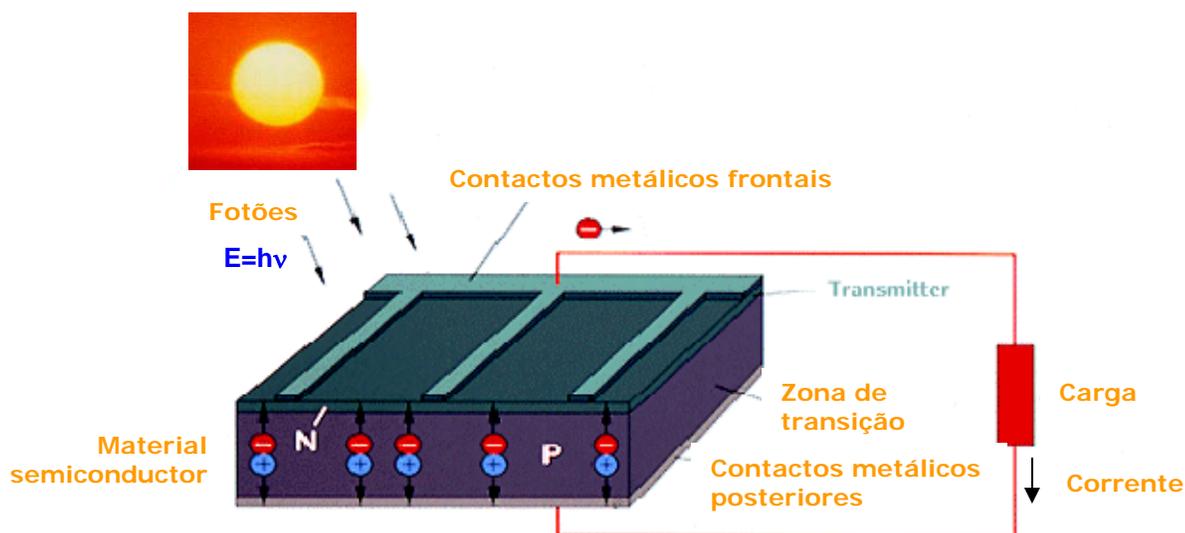


## 4

### Conversão Fotovoltaica da Energia Solar O efeito fotovoltaico (2)

Se compararmos a eficiência das primeiras células fotovoltaicas (anos 50) de 1 a 2%, com os sistemas actuais que convertem de 8 a 20%, assim com os métodos avançados de fabrico de módulos fotovoltaicos, podemos concluir, que em numerosas aplicações de electrificação – rural, remota, urbana, escolar, conexão à rede – já é economicamente viável a sua utilização além do compromisso que estabelece com o consumidor, o uso de uma fonte de produção de energia não poluente.

Os principais componentes da célula fotovoltaica – também designada pilha fotovoltaica – correspondem às camadas (em sanduiche) de materiais semicondutores onde é produzida a corrente eléctrica. Existem um número variado de materiais adequados para serem utilizados “como uma pilha”, todos com vantagens e inconvenientes. Não se pode dizer actualmente, que existe um material semiconductor “ideal”, pois a sua utilização está directamente ligada à aplicação, ao seu custo, eficiência e duração.



Além dos materiais semicondutores, a célula fotovoltaica apresenta dois contactos metálicos, em lados opostos, para fechar o circuito eléctrico. O conjunto encontra-se encapsulado entre um vidro e um fundo, essencialmente para evitar a sua degradação com os factores atmosféricos – vento, chuva, poeira, vapor, etc. – e assim manter as condições ideais de operação por dezenas de anos.

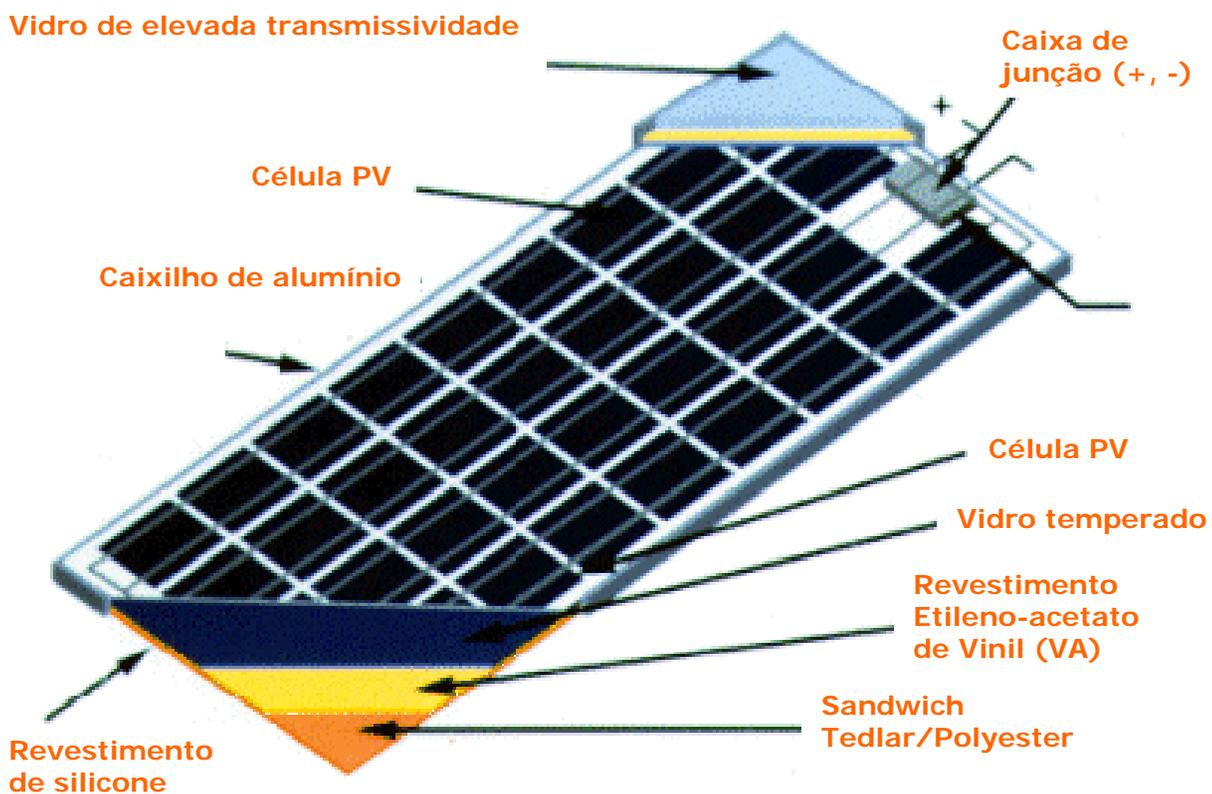


4

## Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

### O efeito fotovoltaico (3)

#### Composição de módulo fotovoltaico

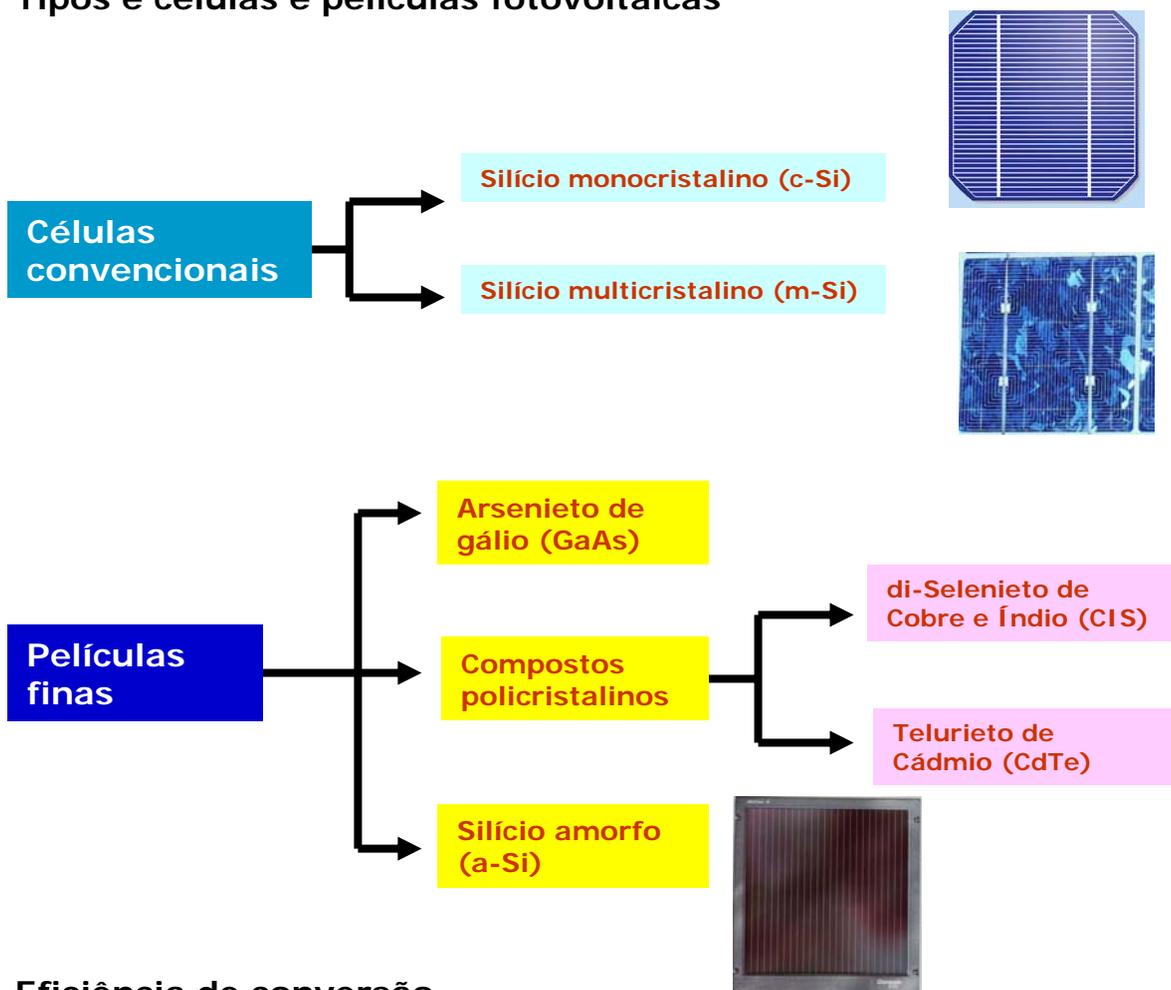




## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar As tecnologias (1)

### Tipos e células e películas fotovoltaicas



### Eficiência de conversão

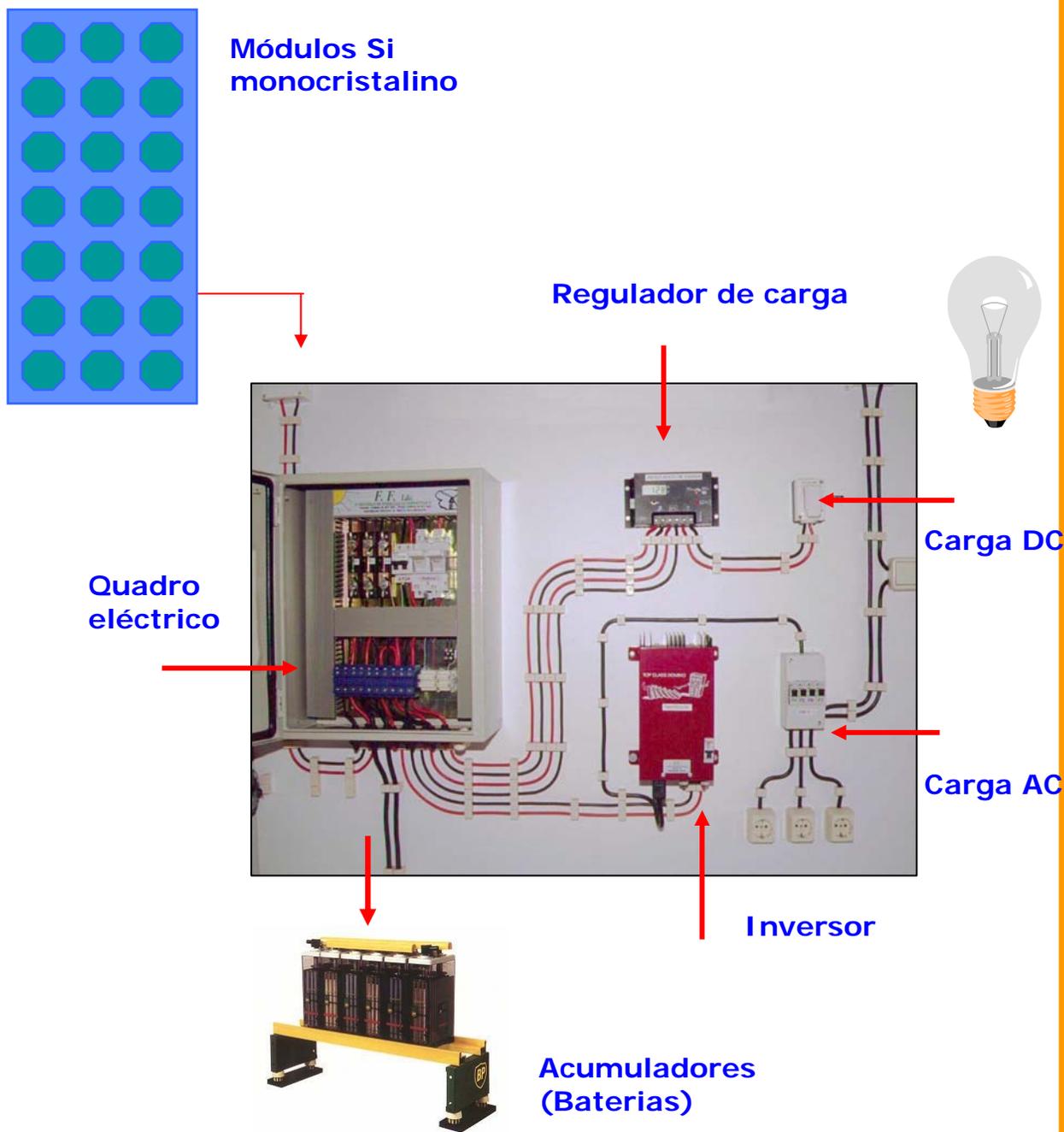
| Tecnologia                 | max (célula)<br>(Laboratório) | max (módulo) | tip.<br>(Indústria) |
|----------------------------|-------------------------------|--------------|---------------------|
| Silício monocristalino     | 24,7 %                        | 22,7         | 12 a 16 %           |
| Silício multicristalino    | 19,8 %                        | 15,3         | 11 a 14 %           |
| Silício amorfo             | 12,7 %                        | -            | 5 a 8 %             |
| Selenieto de Cobre e Índio | 18,2 %                        | 12,1         | -                   |
| Telurieto de Cádmio        | 16,0 %                        | 10,5         | -                   |



4

## Conversão Fotovoltaica da Energia Solar As tecnologias (2)

Esquema de funcionamento de Sistema autónomo fotovoltaico  
(120Wp) - INETI, Lisboa

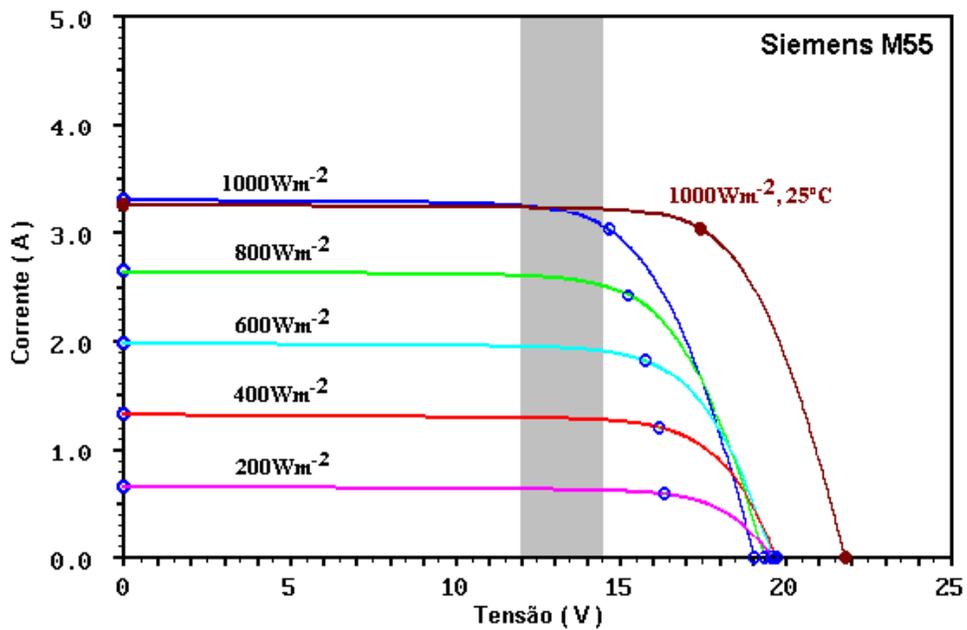




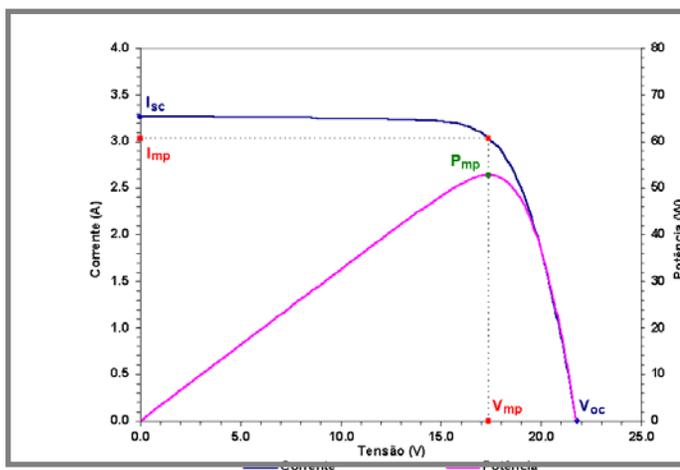
## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar As tecnologias (3)

## Caracterização de módulo fotovoltaico e região de funcionamento



A cinzento indica-se a região de funcionamento do módulo quando ligado a uma bateria de 12V



### Parâmetros característicos

$V_{oc}$  - tensão em circuito aberto, quando  $I = 0$ ,

$I_{sc}$  - corrente de curto circuito, para  $V = 0$ ,

$P_{mp}$  - potência máxima que se pode extrair da célula (produto  $I \times V$  máximo),

$V_{mp}$  - tensão para a qual ocorre potência máxima,

$I_{mp}$  - corrente produzida no ponto de potência máxima.



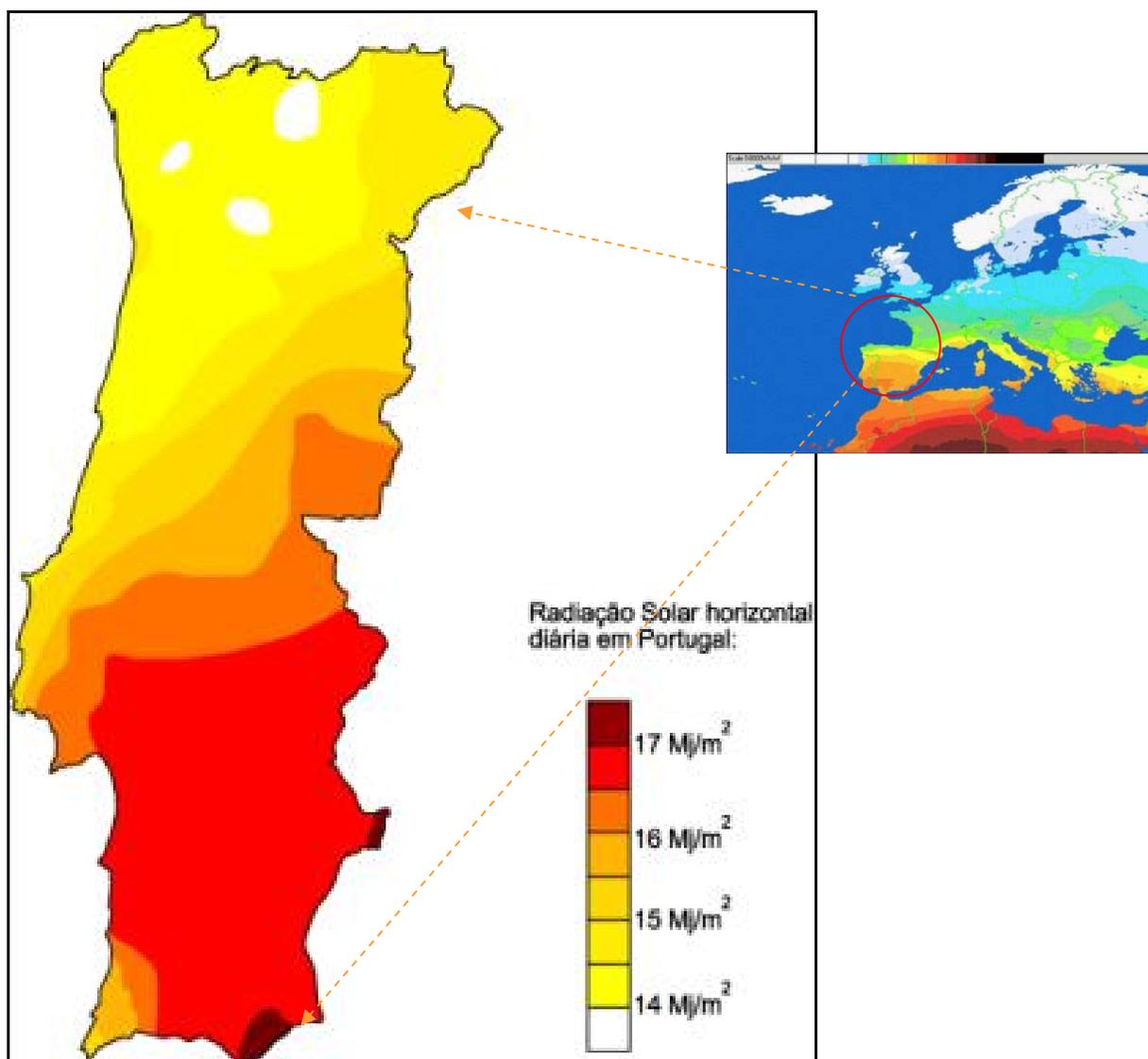
## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar Aplicações (1)

## Recurso Solar em Portugal

Entre os países da UE, Portugal continental apresenta um dos mais elevados recursos solares:

**1400 – 1800 kWh/m<sup>2</sup>/ano** (Irradiação no plano horizontal)



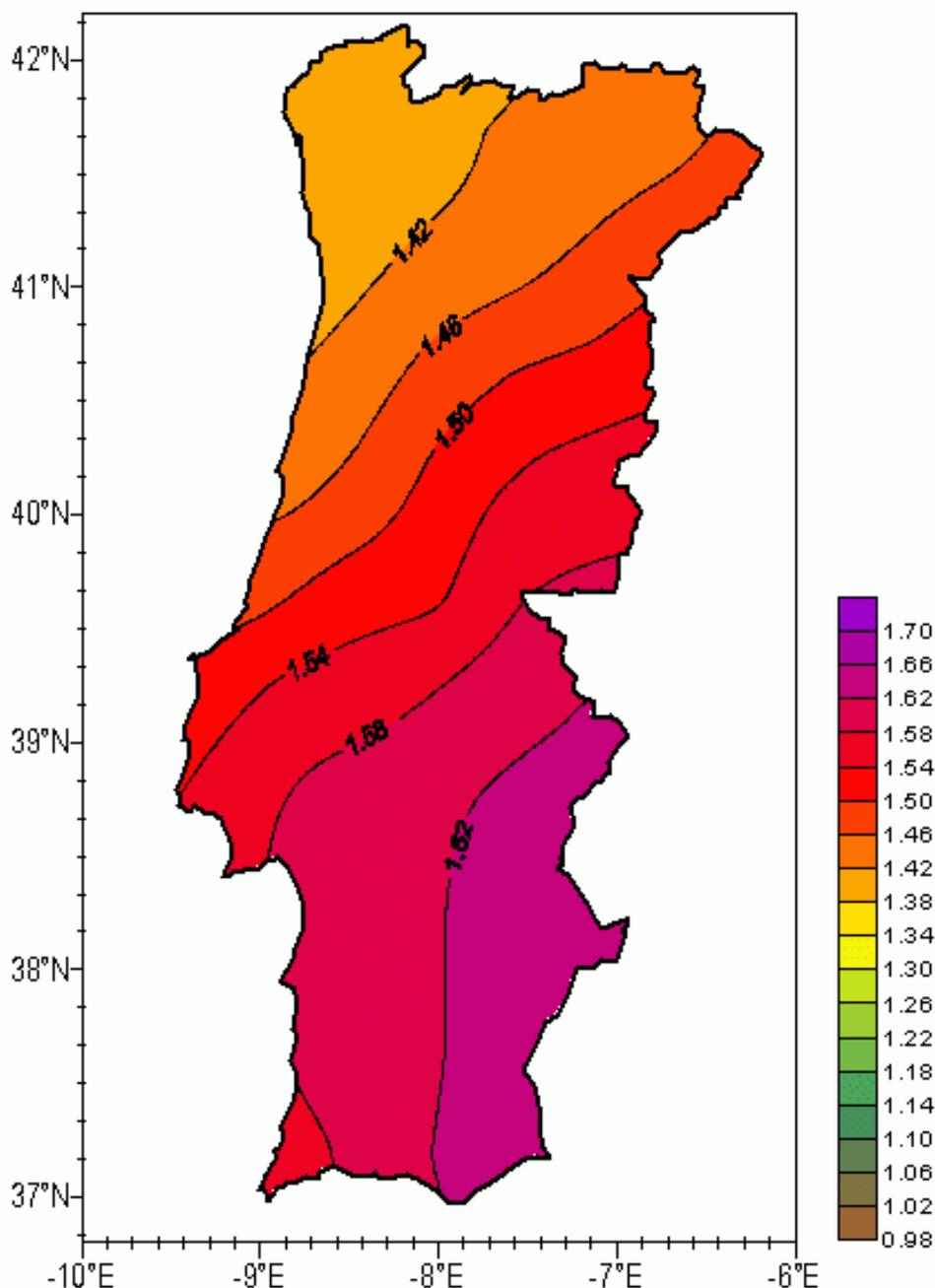


## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar Aplicações (2)

Estimativa da produção eléctrica fotovoltaica

Índice kWh/Wp  
Sistemas PV ligados à rede com inclinação 20° Sul





## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar As aplicações (3)

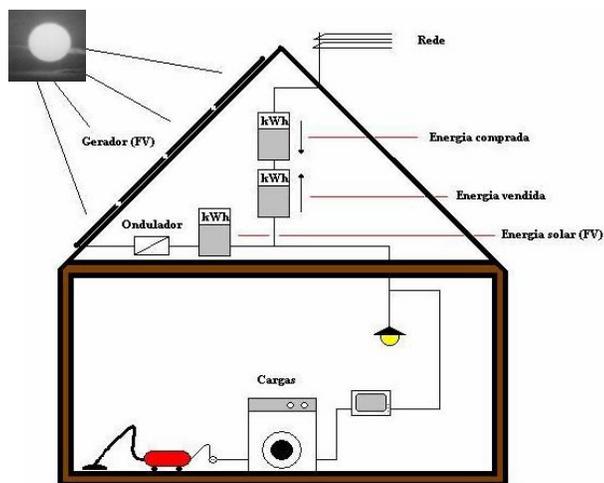
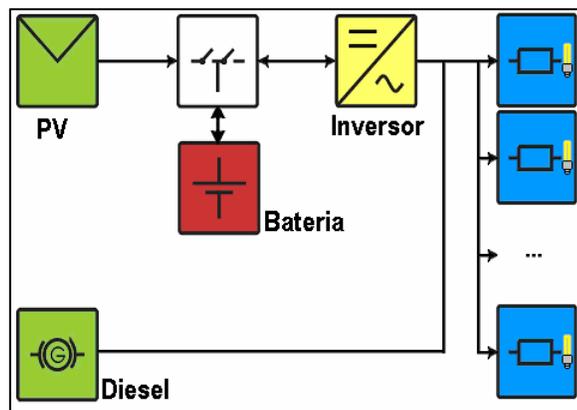
### TIPOLOGIAS

#### Sistemas autónomos/híbridos

- Electrificação de casas em locais isolados (meio rural).
- Bombagem de água (sistema directo).
- Sinalização (bóias marítimas, faróis, aeroportos, passagens de nível, etc.).
- Sistemas de telecomunicações (TV, rádio, telefone).
- Dessalinização de água do mar.
- Protecção catódica.
- Aplicações de micro-potência (rádios portáteis, relógios, calculadoras, etc.).

#### Sistemas ligados à rede

- Integração em edifícios.
- Centrais fotovoltaicas.



### ESPECIFICIDADES

#### Vantagens

- Benignos do ponto de vista ambiental
- Modulares e sem partes móveis (sujeitas a desgaste)
- Inexistência de ruídos ou cheiros;
- Reduzida exigência de manutenção;
- Elevado ciclo de vida (20-30 anos no caso do Silício cristalino)

#### Inconvenientes

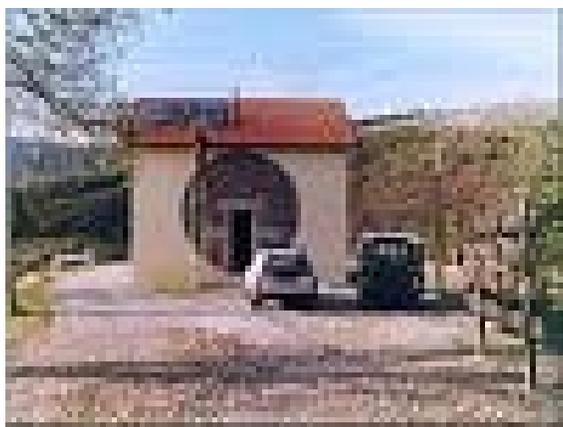
- Elevado custo de instalação
  - módulos (3-4 €/Wp) e sistemas (6-12 €/Wp)
- Rendimento relativamente baixo (10-15%)
- Reduzida densidade de potência (100-150 W/m<sup>2</sup>)



## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar As aplicações (4)

### ELECTRIFICAÇÃO RURAL



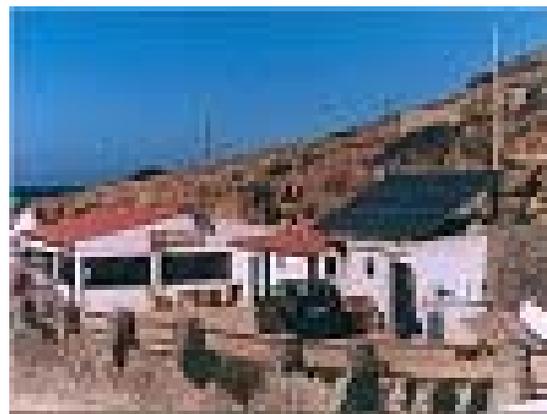
Sistema de iluminação e refrigeração – Casa-Abrigo do Covão da Ponte – Manteigas



Sistema de iluminação e TV em Moradia - Algarve



Sistema de iluminação e TV em Moradia - Beira Alta



Sistema de iluminação e refrigeração em restaurante – Costa Vicentina



## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar As aplicações (5)

## SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES



Retransmissores de TV (sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos)



Telefones SOS - Brisa (AE, IPs)

## SISTEMAS EM ESCOLAS

### Projecto AMPER - Escolas PV (Alentejo, 2004)

- Escola Secundária de Moura - 25 kWp
- Escola Básica de Amareleja - 35 kWp
- Escola Profissional de Moura - 15 kWp





## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

## As aplicações (6)

### Mini-redes de distribuição de energia eléctrica

#### Projecto de Ourique [2000, Thermie]

**3 centrais híbridas** independentes, geridas pela EDP, alimentando 5 aldeias isoladas no concelho de Ourique, através de mini-redes de distribuição (55 casas, iluminação pública, bombagem de água).

#### Potência instalada

Sistemas Fotovoltaicos **42 kWp**

Sistemas eólicos **55 kW**

Sistemas diesel **3x15 kW**



Ourique – Central de Cismalhas  
(PV = 21 kWp; Eólico = 2 x 15 kW)



Ourique – Central de Monte Corte Coelho  
(PV = 10,5 kWp)



Barcelos – Central de S. Brás (PV= 4,96 kWp)

#### Central de S. Brás [2003, Barcelos]

Sistema fotovoltaico com 4,96 kWp, conectado à rede (PRE), projectada e instalada pela SunTechnics/COEPTUM Engenharia.

Fornecer à rede a totalidade da energia eléctrica produzida (~0,5 €/kWh)



## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar As aplicações (7)

## Sistemas integrados conectados à rede eléctrica

### Projecto BP Sunflower

[1998-2000]

**14 sistemas** integrados em coberturas de estações de serviço da BP.

Potência por sistema: **14-22 kWp**  
Potência total: ~**250 kWp**



Lisboa – Parque das Nações (21 kWp)



Setúbal – Edifício EDP (10 kWp)

### Projecto EDP-Setúbal

[1994, Thermie]

Sistemas interligados com a rede de baixa tensão (BT) instalados em edifícios da EDP de Setúbal

Potência: **10 kWp**

### Projecto EDP-Faro

[1996, Thermie]

Sistemas interligados com a rede de baixa tensão (BT) instalados em edifícios da EDP de Faro

Potência: **5 kWp**



Faro – Edifício EDP (5 kWp)



## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

## Plataformas de energias renováveis (1)

**INETI**

### Departamento de Energias Renováveis

O Departamento de Energias Renováveis do INETI tem como missão o desenvolvimento do conhecimento técnico e científico na área das Energias Renováveis e temas afins, visando dotar o País de saber-como na vanguarda destas áreas, bem como de infraestruturas de apoio ao sector industrial, nomeadamente através dos seus Laboratórios.



Plataforma fotovoltaica de testes de sistemas de 2,2 kWp (1989)  
Campus do INETI - Lisboa



Sistema híbrido eólico-fotovoltaico para electrificação rural 1,1kWp  
Campus do INETI - Lisboa

Única entidade nacional a cobrir simultaneamente a quase totalidade do panorama das tecnologias de Energias Renováveis, entre as competências e actividades do DER destaca-se no domínio do **Solar Fotovoltaico** demonstração e ensaio de sistemas, dimensionamento e projecto, integração em edifícios, redes híbridas, modelização dos aspectos Técnicos e Socio-Económicos, avaliação técnico-económica de projectos, monitorização de sistemas, auditorias.



Sistema de electrificação autónomo de produção de água por osmose inversa -  
Campus do INETI - Lisboa



## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

## Plataformas de energias renováveis (12)

### LABELEC

Faz parte do Grupo EDP, acompanha o desenvolvimento tecnológico nas suas áreas de actuação e possui uma plataforma de energias renováveis constituída por 3 sistemas interligados com a rede de baixa tensão (BT):

- sistema fotovoltaico móvel de 4 kWp
- sistema fotovoltaico fixo de 1,4 kWp
- sistema híbrido - 0,5 kWp de fotovoltaico + 0,9 kW de eólico



EDP – LABELEC - Plataforma de Energias Renováveis- Sacavém (2004)



Universidade Nova de Lisboa

### Departamento de Ciências dos Materiais

#### Secção de Materiais Semicondutores

A secção de Materiais Semicondutores do Departamento de Ciências dos Materiais (UNL), tem a seu cargo o leccionação de disciplinas básicas de especialização e projecto das licenciaturas em Engenharia de Materiais e Engenharia Física, no domínio dos materiais e dispositivos semicondutores, conversão de energia, optoelectrónica e processos de microelectrónica.

Para além desta actividade o grupo colabora ainda nos Mestrados em Engenharia de Materiais, Gestão e Qualidade dos Materiais, mestrado Europeu de Energias Renováveis.



UNL – FCT – Plataforma de Energias Renováveis- Monte de Caparica (2002)



## 4

### Conversão Fotovoltaica da Energia Solar Energia fotovoltaica no espaço ... Hoje ! (1)



Estação Espacial Internacional

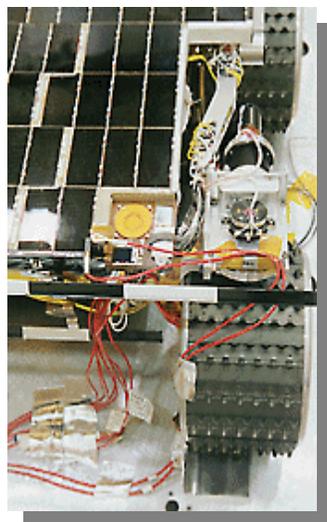
Tomando como exemplo singular, no sistema de produção eléctrica da Estação Espacial Internacional (ISS), verificou-se a selecção de Silício monocristalino (Si) como material de base para a construção das células dos módulos fotovoltaicos que deverão garantir cerca de 110 kW (tipicamente o mesmo que 55 casas comuns).



PoSAT – Micro satélite português (em órbita)



MIR – Estação espacial soviética (destruída)



Rover em Marte - NASA

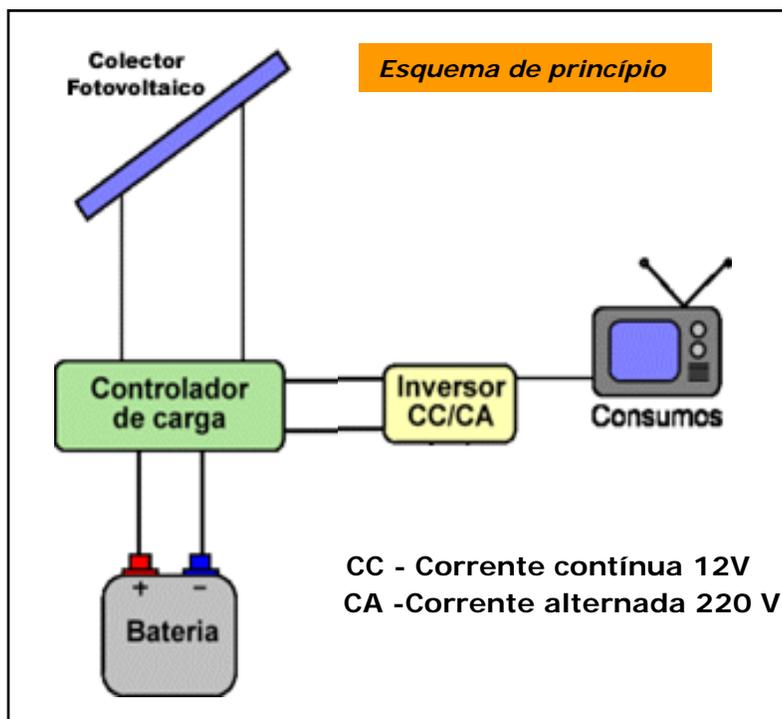


## 4

# Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

## Actividades didácticas (1)

### Iluminação com energia solar fotovoltaica



#### O problema

Na actual sociedade urbana, o facto de se usufruir de iluminação depois do pôr-do-sol é uma situação tão banal que pouca gente pode argumentar que é um luxo. O mesmo não se aplica certamente, em determinadas regiões ou países em vias de desenvolvimento. No entanto, as comunidades ou a unidade familiar que esteja nessas condições, acabam por tolerar essas faltas de qualidade de vida na iluminação : recorrendo a velas, candeeiros a petróleo e a gás.

Um sistema fotovoltaico apresenta algumas vantagens relativamente a outras fontes de energia para utilização local e portátil (querosene, lenha ou gás), ao proporcionar melhor qualidade de luz, com um único (ainda) constrangimento: o seu elevado custo.

#### Como funciona

Em locais isolados ou desviados da rede eléctrica, a solução emergente e eficiente, que oferece possibilidade de utilização imediata em aplicações tão diversas como a iluminação, a refrigeração, a comunicação (rádio e TV), etc. é sem dúvida uma instalação solar com módulos fotovoltaicos.

Um sistema de iluminação é utilizado, vulgarmente, à noite ! Portanto, um candeeiro solar necessitará de utilizar o período de exposição solar (dia) para carregar a bateria que fornecerá electricidade à lâmpada do sistema (noite).

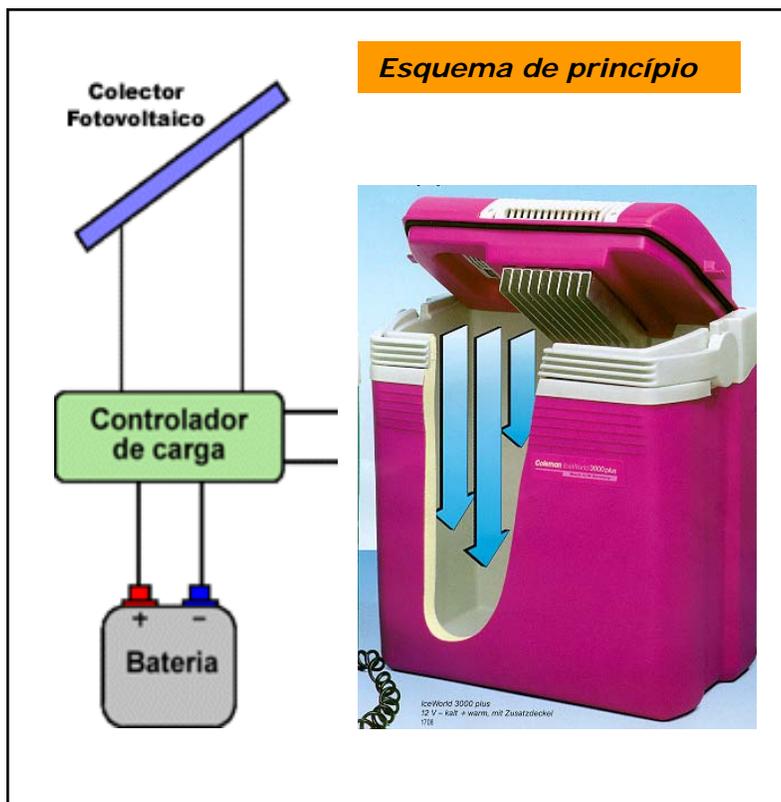


4

## Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

### Actividades didácticas (2)

### Refrigeração com energia solar fotovoltaica



#### O problema

O **Refrigerador Solar** representa uma micro instalação produtora e autoconsumidora de energia.

Além disso, é uma utilidade que ultrapassa a simples qualidade de vida, permitindo a conservação de vacinas e medicamentos em lugares remotos ou em situações de emergência.

#### Como funciona

O sistema de frio por efeito termoelétrico Peltier permite um ciclo térmico de arrefecimento sem elementos móveis e sem líquido refrigerante, funcionando a partir de uma fonte de energia eléctrica de corrente contínua (12 ou 24 VDC) .

Para ajustar a fonte de energia solar ao consumo do sistema refrigerador é necessário a utilização de um acumulador (bateria), que combinado com o painel fotovoltaico deve possibilitar uma verdadeira autonomia de 24 horas de funcionamento.

Para completar a instalação é necessário um regulador electrónico para protecção e controlo de todo o sistema .



## 4

### Conversão Fotovoltaica da Energia Solar

Para saber mais ...

#### Bibliografia e sites da Internet

“Conversão Térmica da Energia Solar”, Cruz Costa, Jorge; Lebeña, Eduardo, SPES/INETI (disponível em: [http://www.spes.pt/Manual\\_Instaladores.pdf](http://www.spes.pt/Manual_Instaladores.pdf))

**Energias Renováveis – A Opção Inadiável (SPES) – Manuel Collares-Pereira**

[www.ineti.pt/conteudo/pgdetalheconteudo.php?id=1832&tc=15&idn=107&PHPSESSID=73c707c131923d3211e37ff662b06b64](http://www.ineti.pt/conteudo/pgdetalheconteudo.php?id=1832&tc=15&idn=107&PHPSESSID=73c707c131923d3211e37ff662b06b64) - **Site do Satélite português PoSAT**

<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/press/spirit/20040128a.html> - **Missão da sonda SPIRIT (NASA)**

<http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/press/opportunity/20040128a.html> - **Missão da sonda OPPORTUNITY (NASA)**

[http://www.esa.int/export/esaCP/SEM8ZB474OD\\_index\\_1.html](http://www.esa.int/export/esaCP/SEM8ZB474OD_index_1.html) - **Missão da MARS EXPRESS (ESA)**

[www.spes.pt](http://www.spes.pt) – **Sociedade Portuguesa de Energia Solar**

[www.aguaquentesolar.com](http://www.aguaquentesolar.com) – **Iniciativa Pública AQSpP**

[www.fourmilab.ch/cgi-bin/uncqi/Earth](http://www.fourmilab.ch/cgi-bin/uncqi/Earth) - **mapas de satélite em directo**

[www.speedace.info/solar\\_cars.htm](http://www.speedace.info/solar_cars.htm) - **corridas de carros solares**