

Recursos Energéticos

Energia solar



Prof. Dr. Lucas Barboza Sarno da Silva

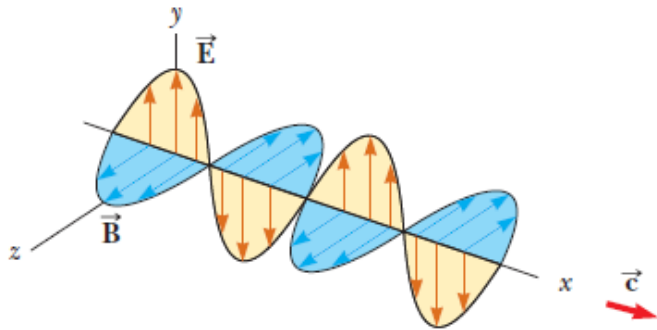
SUMÁRIO

- Uma pequena revisão sobre a luz
- Energia solar
- Aproveitamento da energia solar
- Coletor solar
- Sistemas fotovoltaico (efeito fotovoltaico e conversão de energia)
- Irradiação solar
- Sistemas de utilização da energia fotovoltaica
- Viabilidade de utilização de sistemas fotovoltaicos no Vale do Paraíba
- Aproveitamento da energia solar

Uma pequena revisão sobre a luz

O que é luz?

- Teoria ondulatória (onda eletromagnética)



Fluxo eletromagnético:

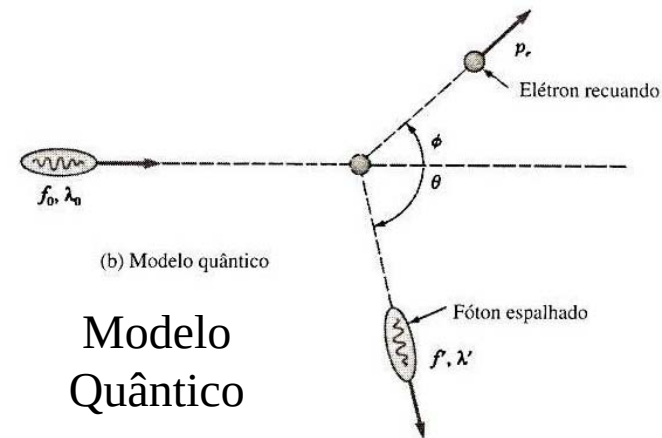
Vetor de Poynting:
$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

Potência por unidade de área

- Teoria corpuscular (fótons)

Energia:
$$E = h \cdot f$$

Momento:
$$p = \frac{E}{c}$$



Exemplo:

Energia solar

O Sol proporciona cerca de 1000 W/m^2 de fluxo eletromagnético à superfície da Terra. Calcular a potência incidente num telhado de $8 \text{ m} \times 20 \text{ m}$.

$$\text{Potência} = S.A$$

$$\text{Potência} = (1.000 \text{ W/m}^2).(8 \times 20 \text{ m}^2)$$

$$\text{Potência} = 1,60 \times 10^5 \text{ W}$$

Aproveitamento da energia

A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes e para geração de potência mecânica ou elétrica.

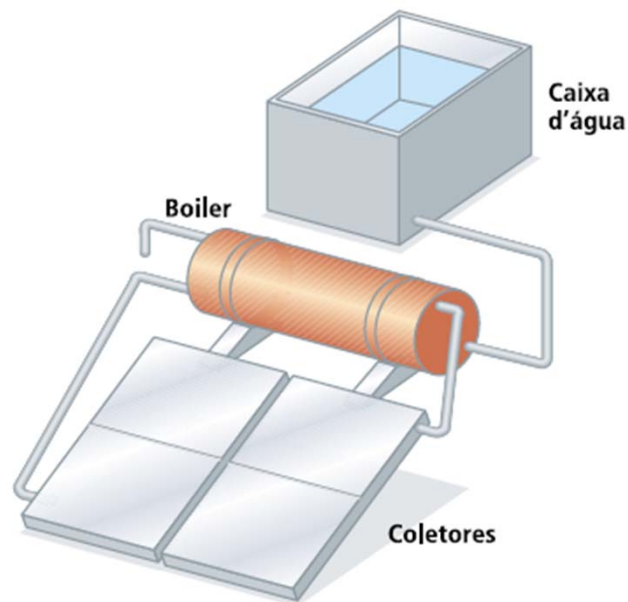
Aproveitamento da energia:

- Coletor solar (aquecimento de fluídos)
- Efeito fotovoltaico
- Efeito termoelétrico

Coletor solar (aquecimento solar ativo)

FIGURA 3.3

Ilustração de um sistema solar de aquecimento de água



Fonte: GREEN, M. A. et al. Solar cell efficiency tables: version 16. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Sydney, v. 8, p. 377-384, 2000 (adaptado).

- Sistemas que necessitem baixa temperatura $< 100^{\circ}\text{C}$ (uso residencial). Necessita uma área relativamente pequena.

Exemplo: Uma residência típica (3 ou 4 moradores) necessita de uma área de $\sim 4 \text{ m}^2$.

Foto Ilustrativa | Illustrative Picture



- Sistemas que necessitem uma temperatura maior $>100^{\circ}\text{C}$ (uso industrial).
Utiliza-se concentrados solares



Concentradores solares de motor *Stirling*

Ivanpah Solar Electric Generating System (Sistema Gerador de Energia Solar Ivanpah)



- 300.000 espelhos (2 x 3) m
Focalizados em três torres de 140 metros de altura, onde a água se transforma em vapor para turbinas de energia.
- 392 MW (140 mil casas)



- 12 km² de terras federais perto da fronteira dos estados da Califórnia e Nevada, nos EUA

O Efeito fotovoltaico

- 1839, por Becquerel

Observou que quando ao iluminar uma solução ácida surgia uma diferença de potencial entre os eletrodos imersos nessa solução.

- 1876, Adams e Day

Observaram efeito similar em dispositivos de estado sólidos fabricados com selênio.

- 1950, nos laboratórios da Bell

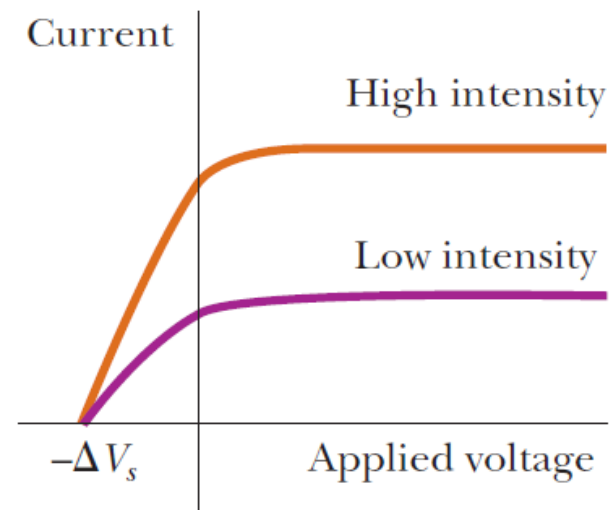
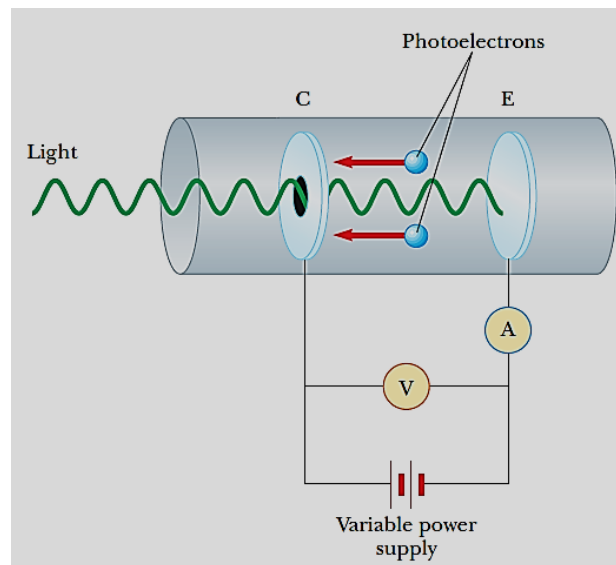
Foram fabricados as primeiras células fotovoltaicas baseadas nos avanços tecnológicos na área de dispositivos semicondutores.

Estas células fotovoltaicas foram fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino e atingiram uma eficiência de conversão de energia solar em elétrica de 6%, com potência de 5mW e área de 2 cm².

Célula fotovoltaica

O Efeito Fotoelétrico

Observado por Hertz (1887) e Hallwachs (1888)



Ocorre a emissão de elétrons de uma placa metálica, quando iluminada por radiação eletromagnética.

Caracterização elétrica de materiais

Estrutura de bandas de energia

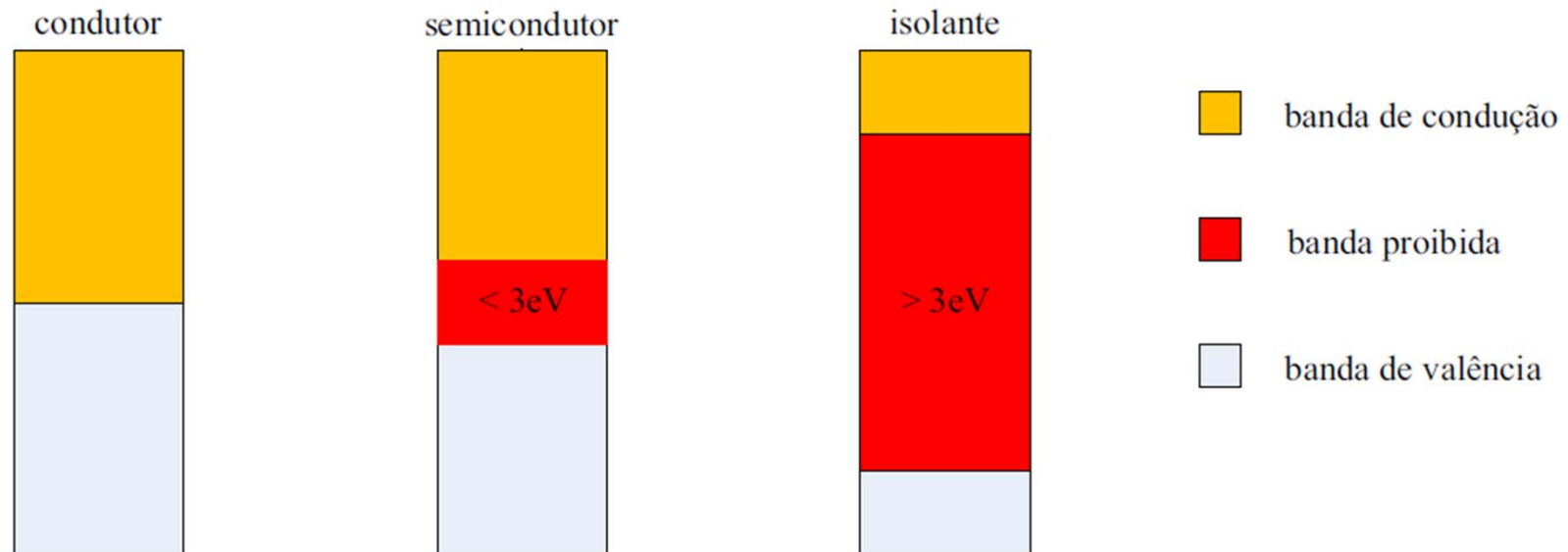
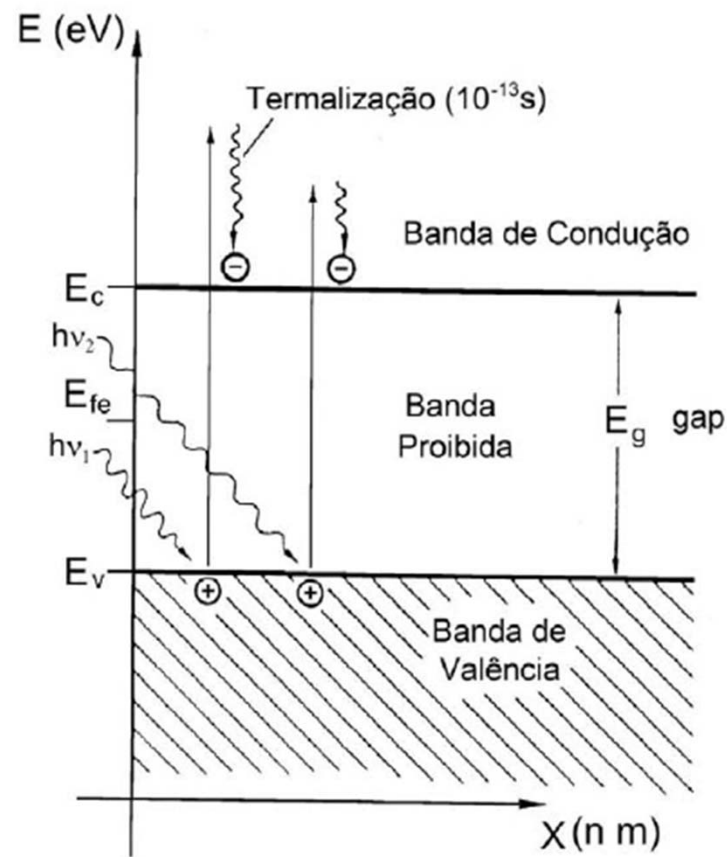


Tabela 3.1 – Bandas proibidas E_g para diversos materiais semicondutores à temperatura de 300 K.

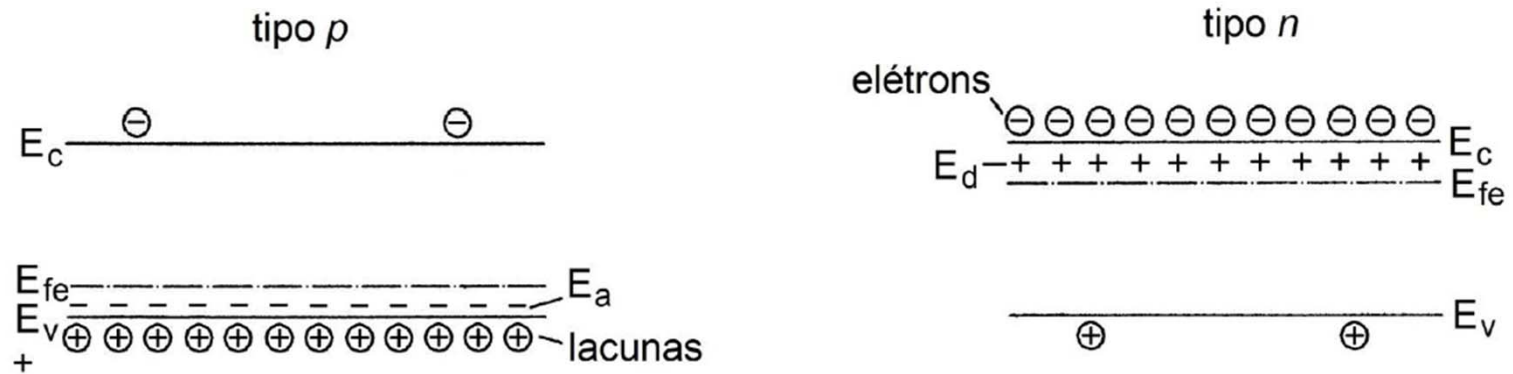
Material	Grupo	E_g (eV)	Material	Grupo	E_g (eV)
Si	elemento	1,12	GaP	III-V	2,26
Ge	elemento	0,66	CdS	II-IV	2,42
GaAs	III-V	1,43	PbS	II-IV	0,35
InSb	III-V	0,18	PbTe	II-IV	0,30
InP	III-V	1,35	CdTe	II-IV	1,45

Efeito fotovoltaico

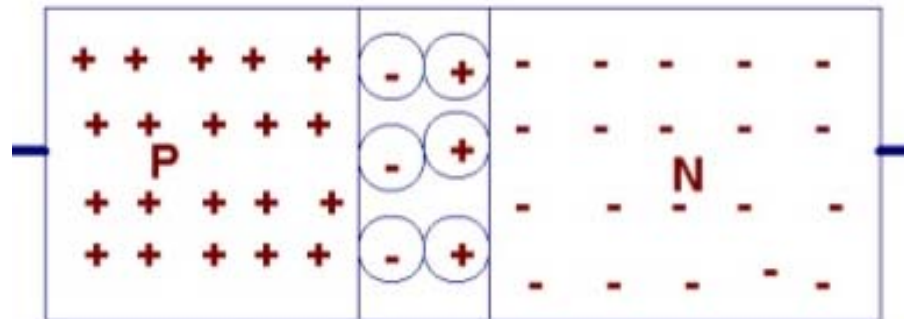
Semicondutor intrínseco

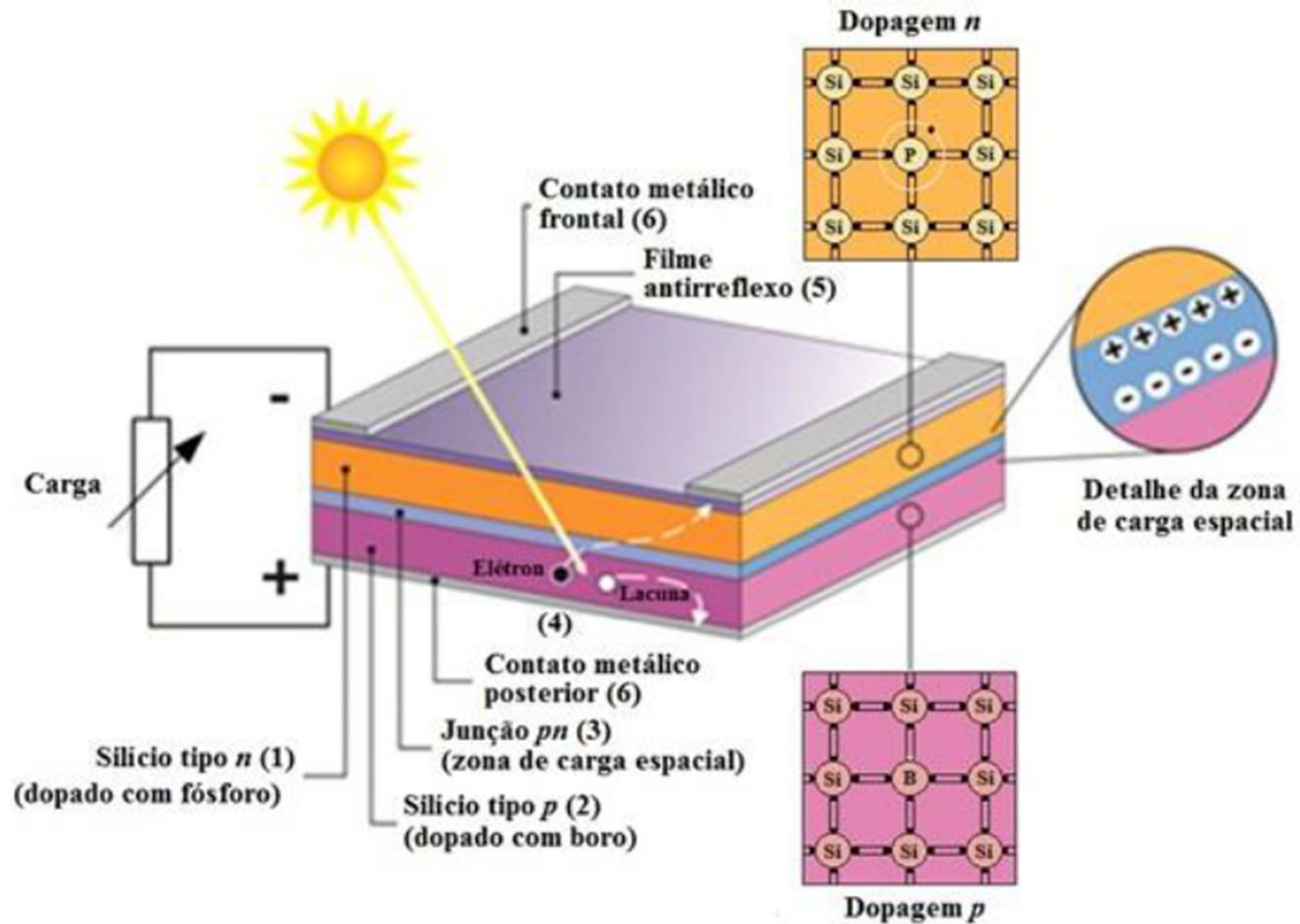


Semicondutores dopados

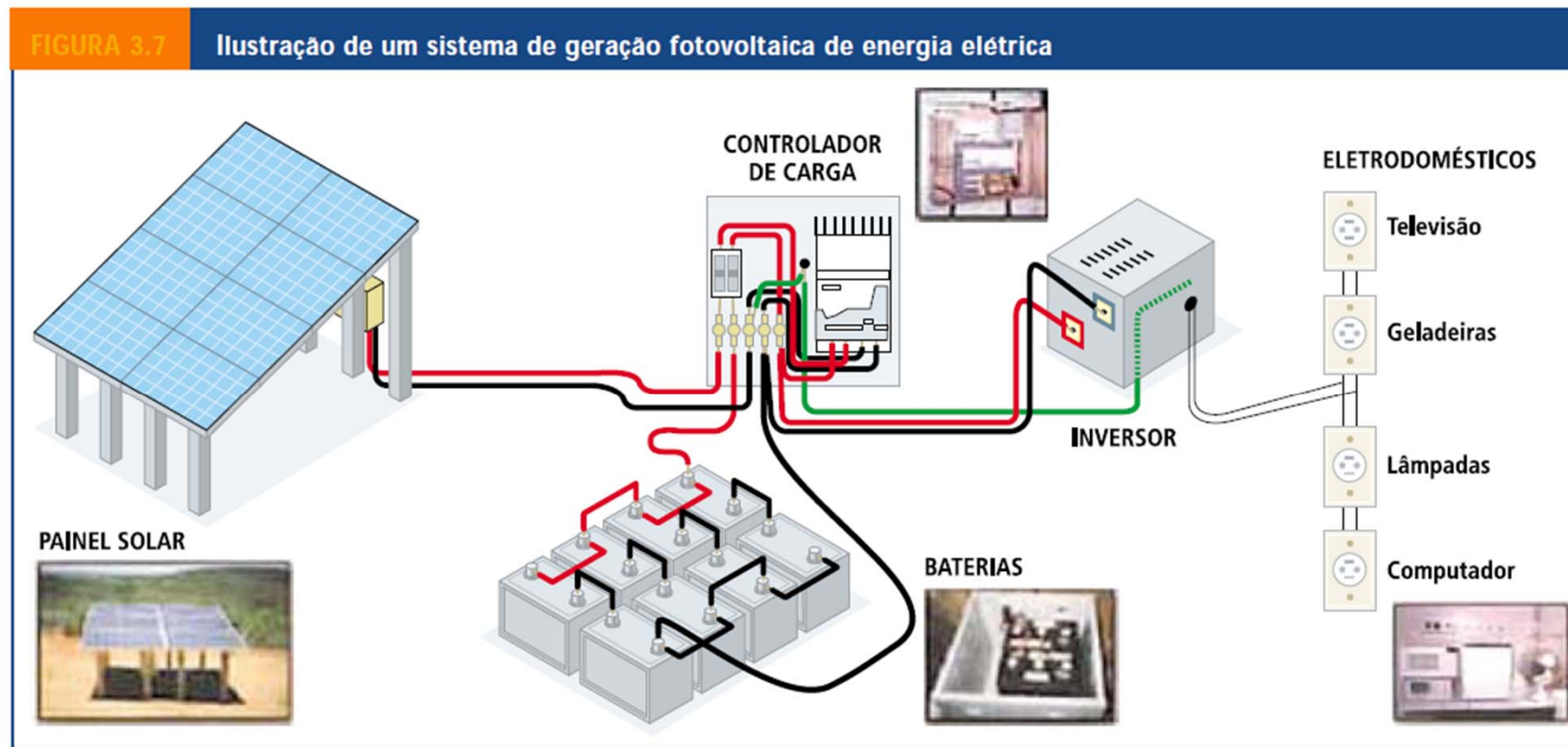


Junção PN





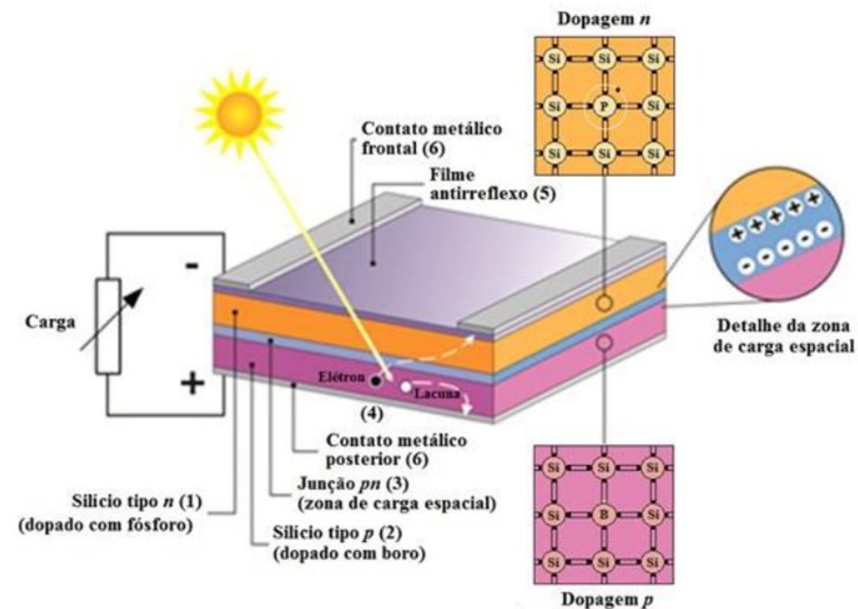
Conversão direta da radiação solar em energia elétrica



Fonte: CENTRO DE REFERÊNCIA PARA A ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO - CRESESB. 2000. Disponível em: www.cresesb.cepel.br/cresesb.htm (adaptado).

Limitadores da eficiência das células fotovoltaicas

- Reflexão na superfície frontal
- Sombra proporcionada pela malha metálica na face frontal
- Absorção nula dos fótons de energia menor que o gap ($E_f < E_g$)
- Recombinação dos portadores de carga
- Resistência elétrica no dispositivo e nos contatos metal-semicondutor
- Fugas de corrente elétrica



Tipos de células fotovoltaicas

Eficiência das melhores células fotovoltaicas fabricadas em laboratórios até 2012 [GREEN et al., 2013]

Tecnologia		Eficiência (%)
Silício	Monocristalino	$25,0 \pm 0,5$
	Policristalino	$20,4 \pm 0,5$
	Filmes finos transferidos ⁴	$20,1 \pm 0,4$
Compostos III A-V A (ou 13-15)	GaAs (filme fino)	$28,8 \pm 0,9$
	GaAs (policristalino)	$18,4 \pm 0,5$
	InP (monocristalino)	$22,1 \pm 0,7$
Calcogênios Compostos II B-VI A (ou 12-16)	CIGS ($\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$) (filme fino)	$19,6 \pm 0,6$
	CdTe (filme fino)	$18,3 \pm 0,5$
Silício amorfo / nanocristalino	Amorfo (a-Si) (filme fino)	$10,1 \pm 0,3$
	Nanocristalino (nc-Si)	$10,1 \pm 0,2$
Células Sensibilizadas por Corantes (DSSC)		$11,9 \pm 0,4$
Células Orgânicas (filme fino)		$10,7 \pm 0,3$
Multijunção	InGaP/GaAs/InGaAs	$37,7 \pm 1,2$
	a-Si/nc-Si/nc-Si (filme fino)	$13,4 \pm 0,4$

Curva característica da célula fotovoltaica

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right]$$

I_L = Corrente fotogerada (A)

I_0 = corrente de saturação reversa do diodo (A)

n = fator de idealidade do diodo, entre 1 e 2, obtido por ajustes de dados experimentais

q = carga do elétron

k = constante de Boltzmann

T = temperatura absoluta (K)

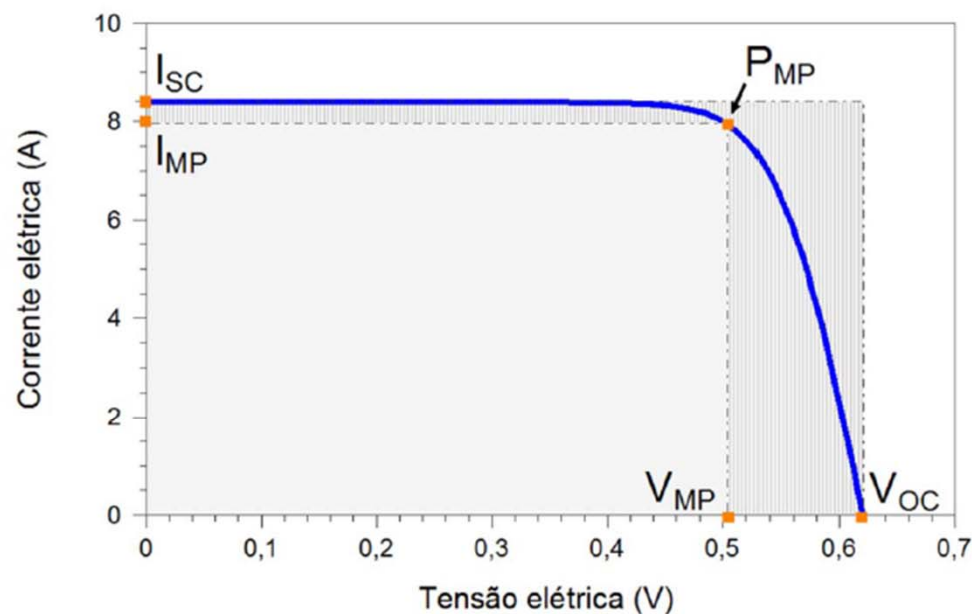
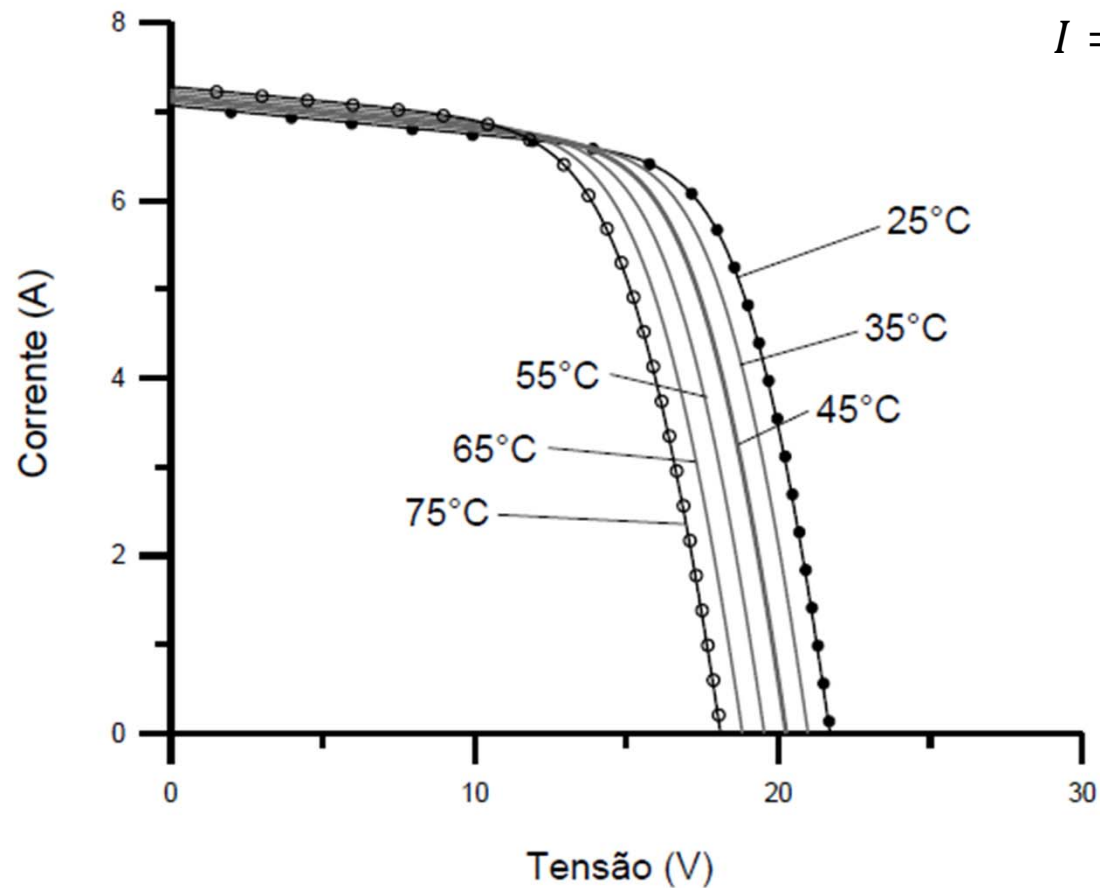


Figura 3.9 - Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica de silício de 156 mm x 156 mm, sob condições-padrão de ensaio. Os principais parâmetros elétricos estão destacados. I_{SC} é a corrente elétrica de curto-circuito, V_{OC} é a tensão de circuito aberto, P_{MP} ⁽⁶⁾ é a potência máxima ou de pico e I_{MP} e V_{MP} são, respectivamente, a corrente e a tensão no ponto de potência máxima.

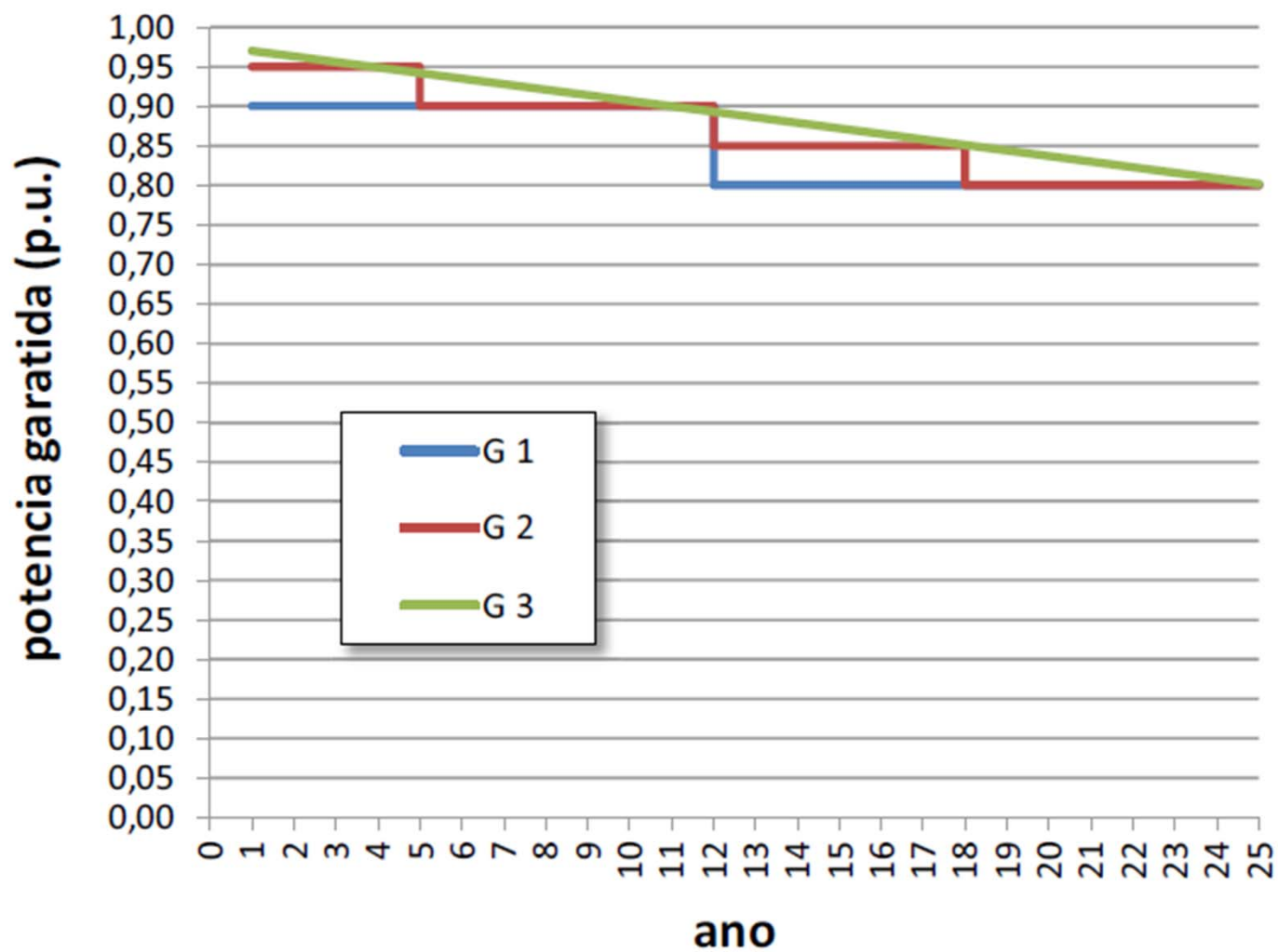
Efeito da temperatura na curva I - V

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right]$$



Efeito causado pela variação da temperatura das células sobre a curva característica I - V para um módulo fotovoltaico de 36 células de silício cristalino (c-Si) sob irradiância de 1.000 W/m^2 .

Degradação das células fotovoltaicas

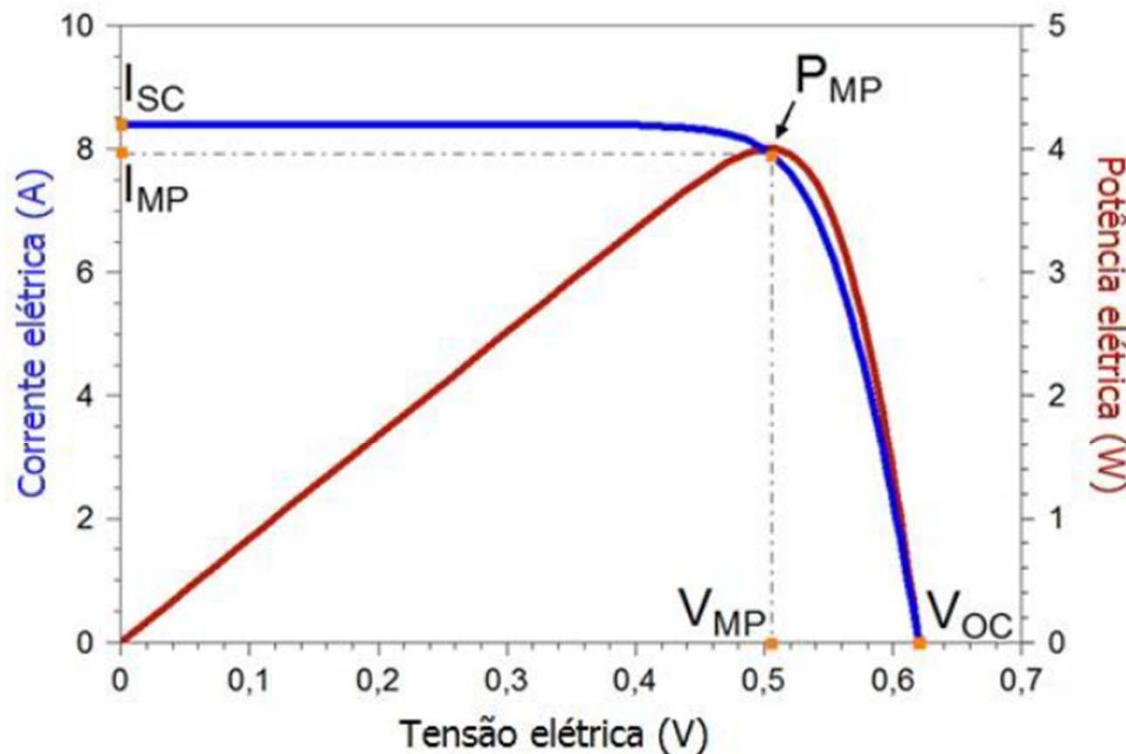


Eficiência de um sistema fotovoltaico

$$\eta = \frac{P_{MP}}{A \cdot G} \cdot 100\%$$

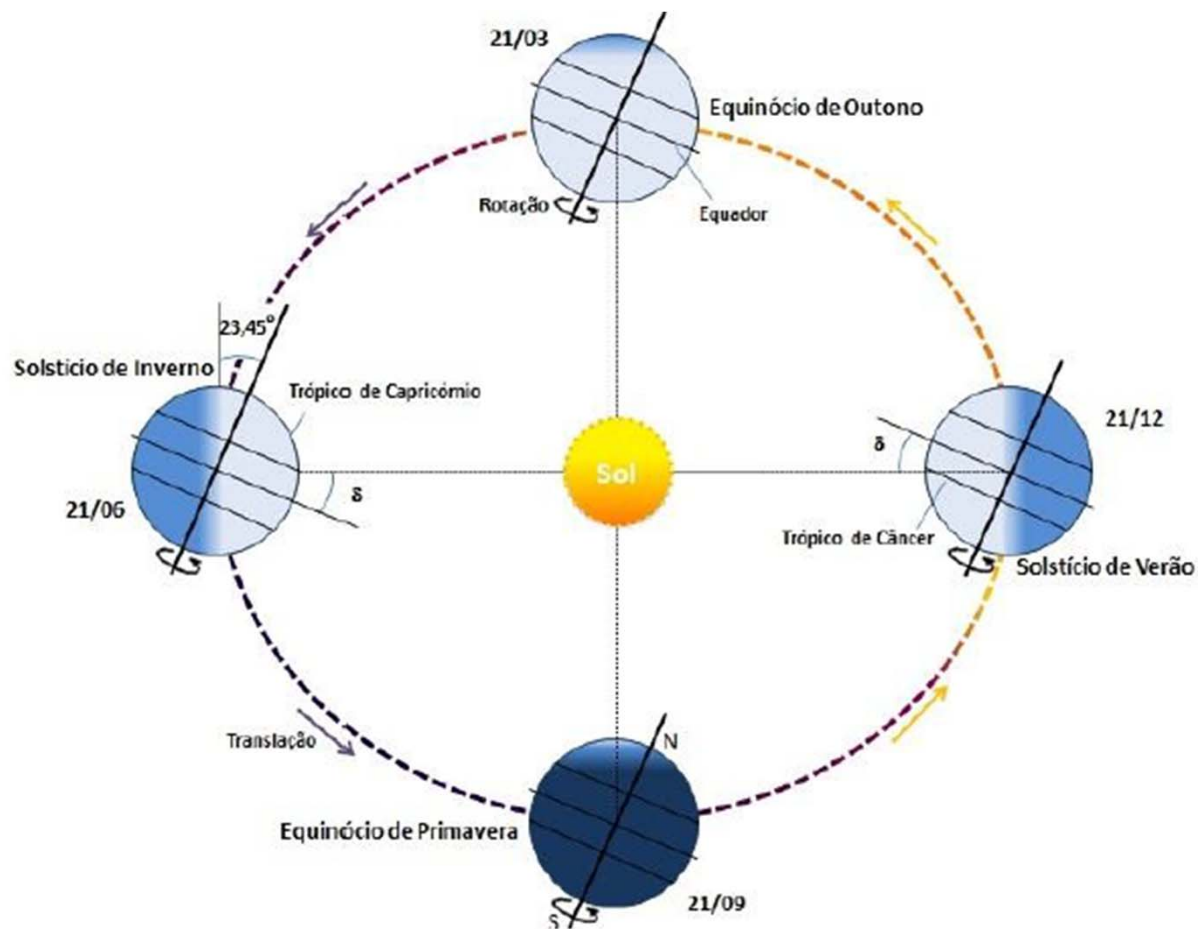
A = área da célula (m^2)

G = irradiação solar incidente (W/m^2)



Potência elétrica em função da tensão elétrica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino de 156 mm x 156 mm, sob condições-padrão de ensaio. Os principais parâmetros elétricos estão destacados.

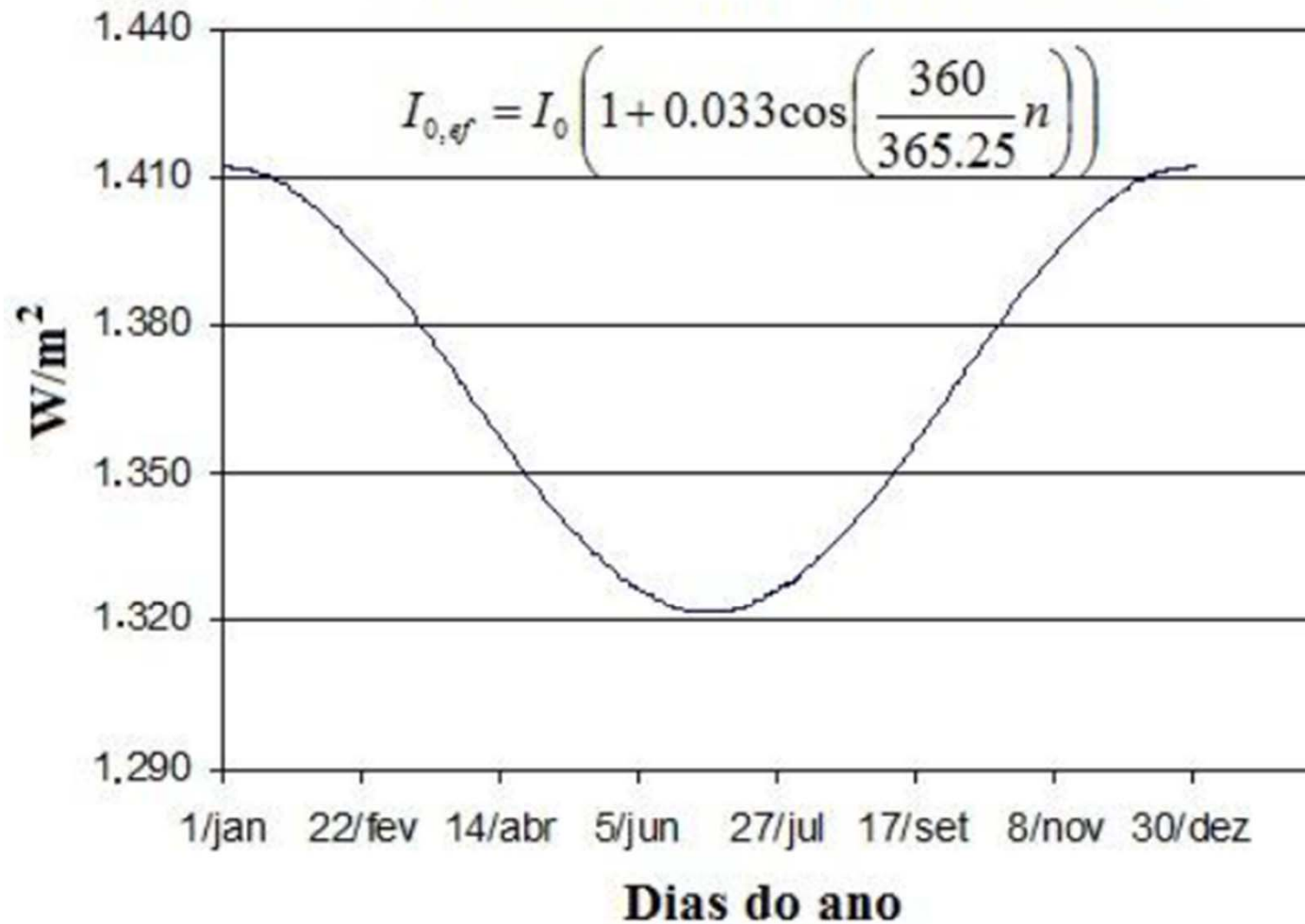
Irradiação incidente



(b)

Órbita da Terra em torno do Sol, com seu eixo N-S inclinado de um ângulo de $23,45^\circ$, indicando as estações do ano no hemisfério Sul.

Irradiância Extraterrestre Efetiva

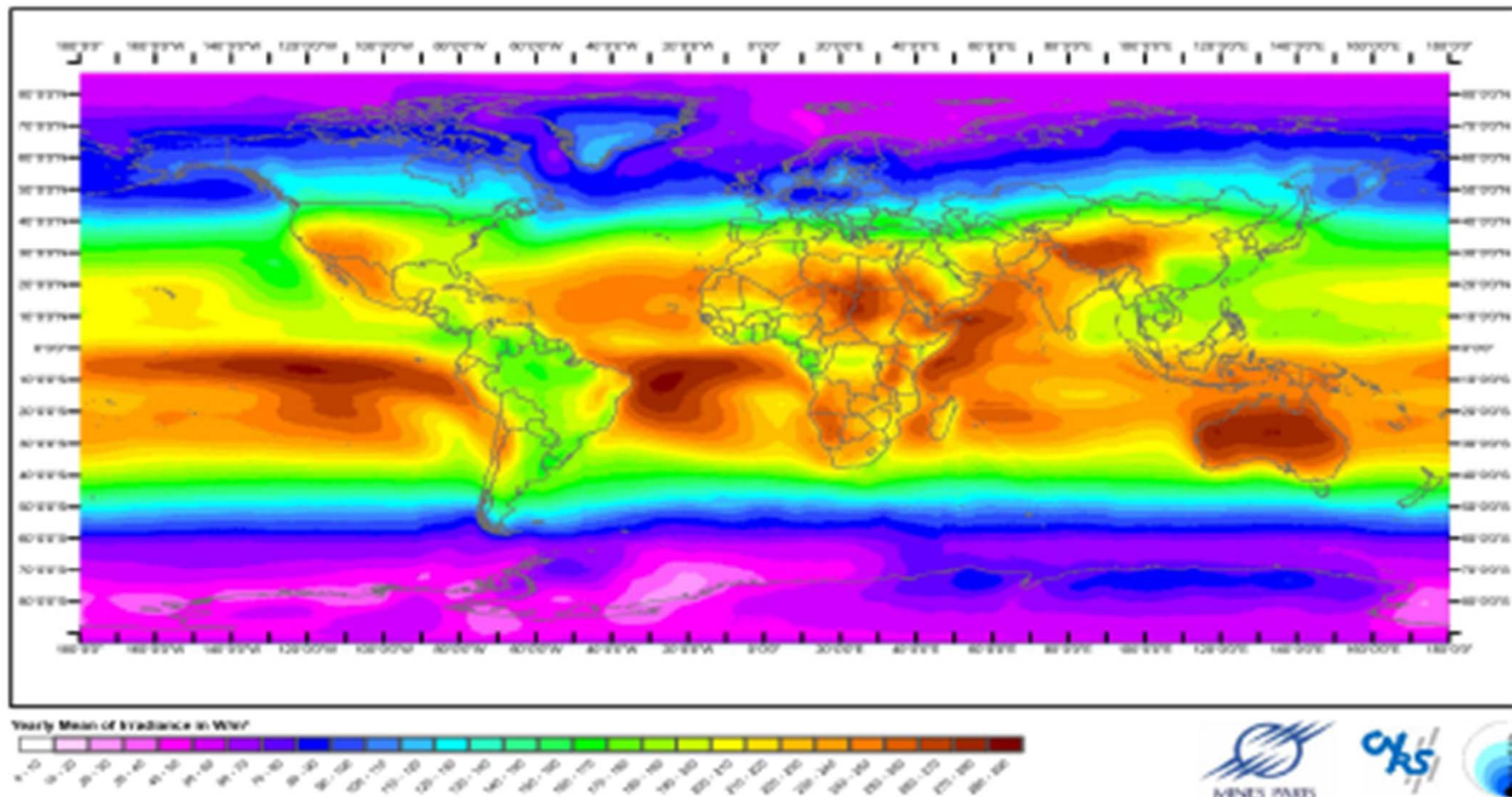


$I_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$ (Word Radiation Center)

n = representa o dia juliano, contando de 1 a 365.

Hemisfério Sul

Averaged Solar Radiation 1990-2004



Realized by Michel Aubouin, Mireille Lefèvre, Lucien Pfaff,
 Edited and produced by Thierry Rancin, Date of production: 23 November 2006,
 Centre for Energy and Processes, Ecole des Mines de Paris / AMNES / CMPS.

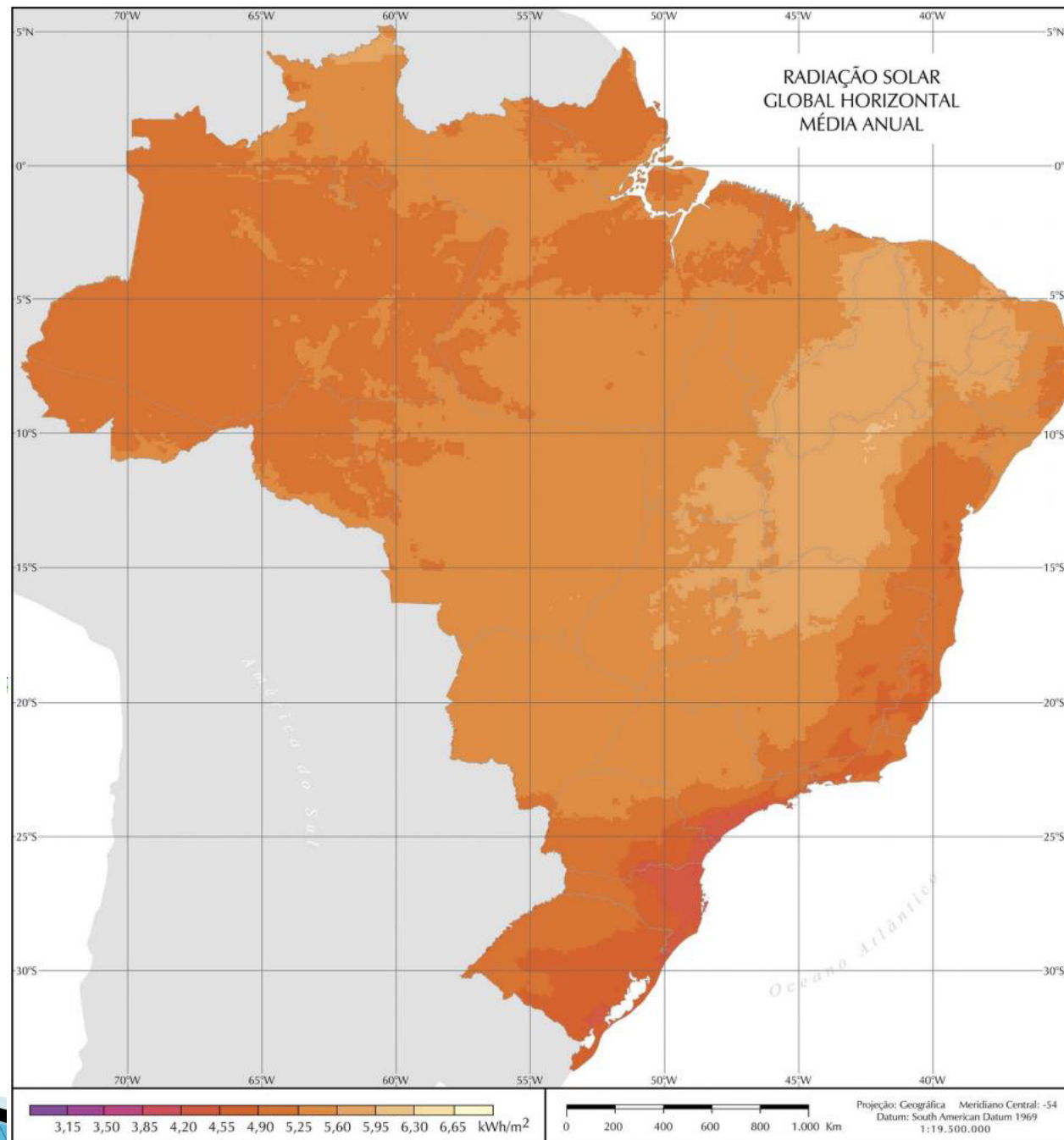


Tabela 2.2 - Unidades para a radiação solar (irradiância e irradiação) e fatores de conversão

Para converter de:	Para:	Multiplique por:
$\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$	W/m^2	697,8
W/m^2	$\text{cal/cm}^2 \cdot \text{min}$	0,0014331
W/m^2	$\text{mcal/cm}^2 \cdot \text{s}$	0,023885
$\text{MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$	$\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$	0,27778
Langley/dia	$\text{kWh/m}^2 \cdot \text{dia}$	0,01163
cal/cm^2	J/cm^2	4,1868
cal/cm^2	kWh/m^2	0,01163
J/cm^2	cal/cm^2	0,23885
J/cm^2	kWh/m^2	0,0027778
kWh/m^2	cal/cm^2	85,985
kWh/m^2	J/cm^2	360
Langley	cal/cm^2	1

Sistemas isolados ou autônomos (*off-grid*)

Sistemas independentes da rede elétrica convencional

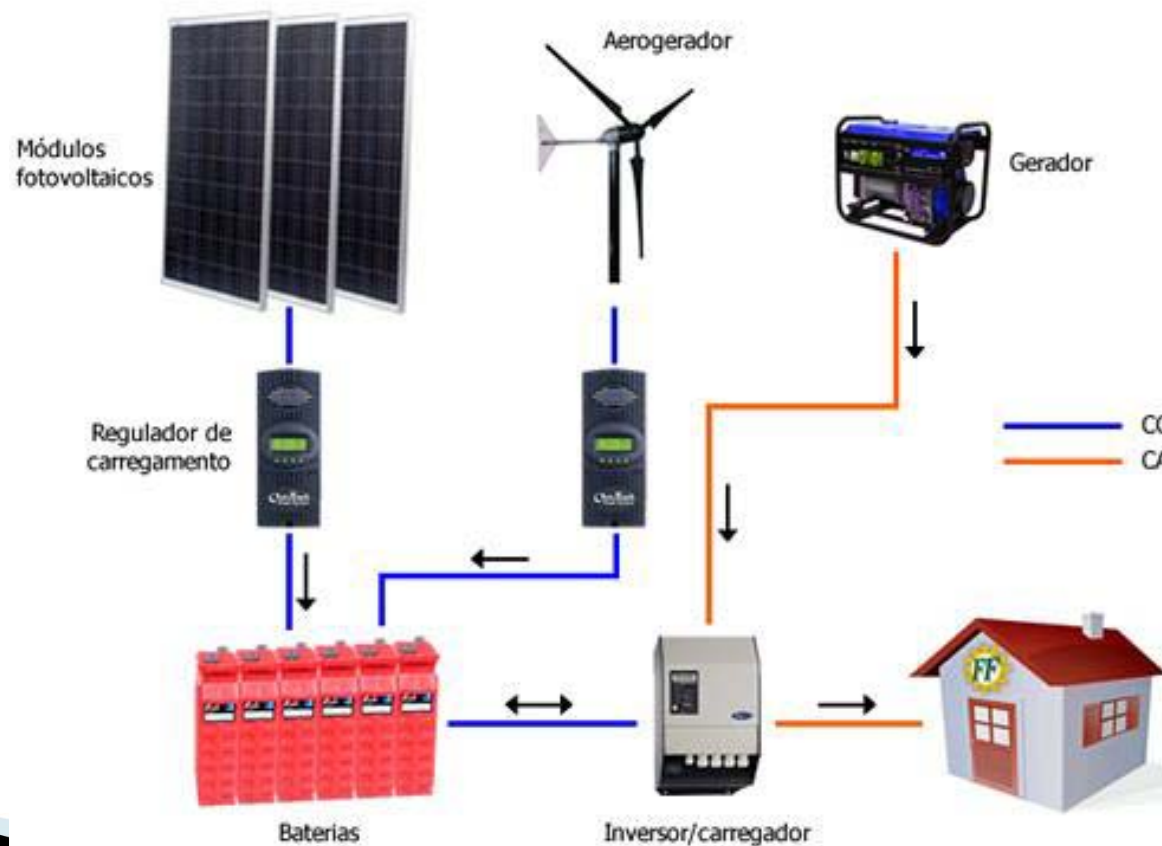
- Comunidades isoladas



Sistemas híbridos

Sistemas híbridos são compostos da junção de diversas fontes de energia, para complementar umas às outras.

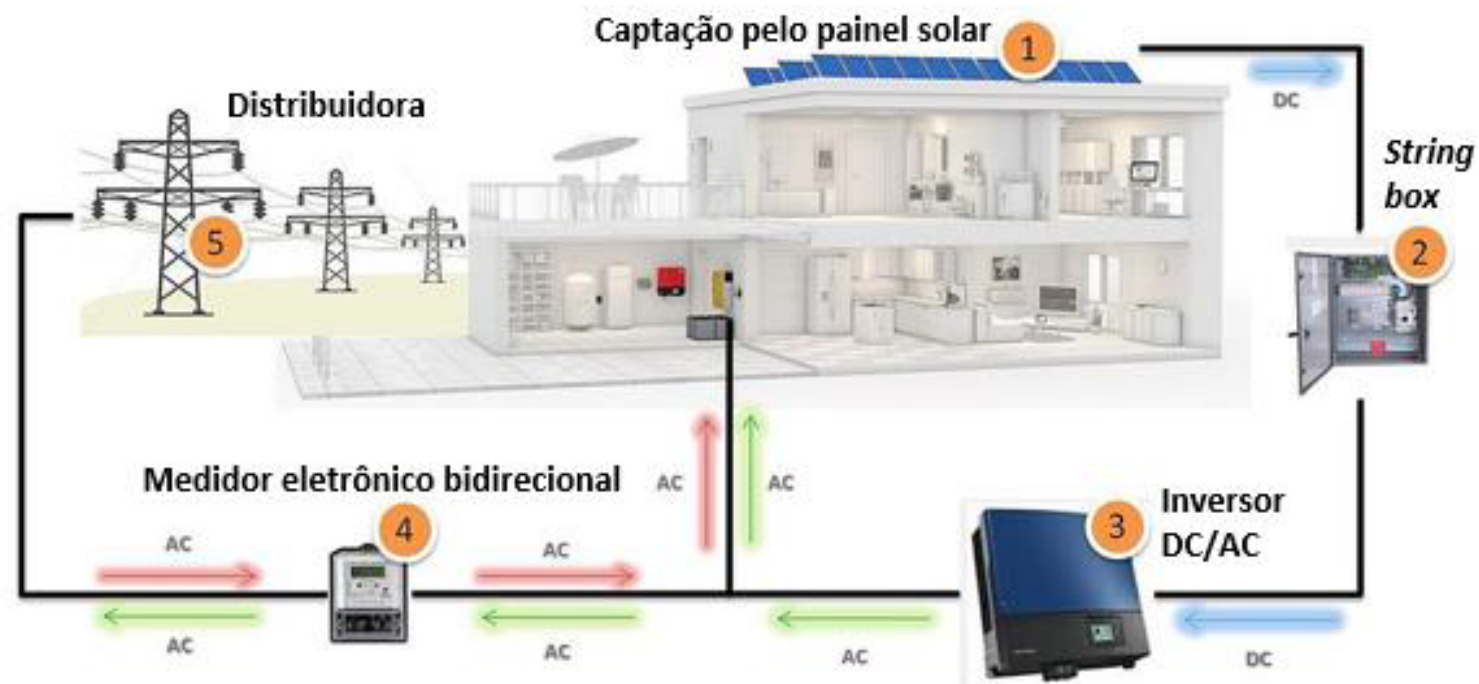
- Necessita um sistema de controle complexo.



Sistemas conectados à rede (*grid tie*)

A energia produzida é distribuída para a casa e seu excedente é mandado para a rede central, ou se ela for produzida em parque gerador de energia fotovoltaica toda a sua produção é enviada para a rede central, com isso não é necessário o armazenamento de energia.

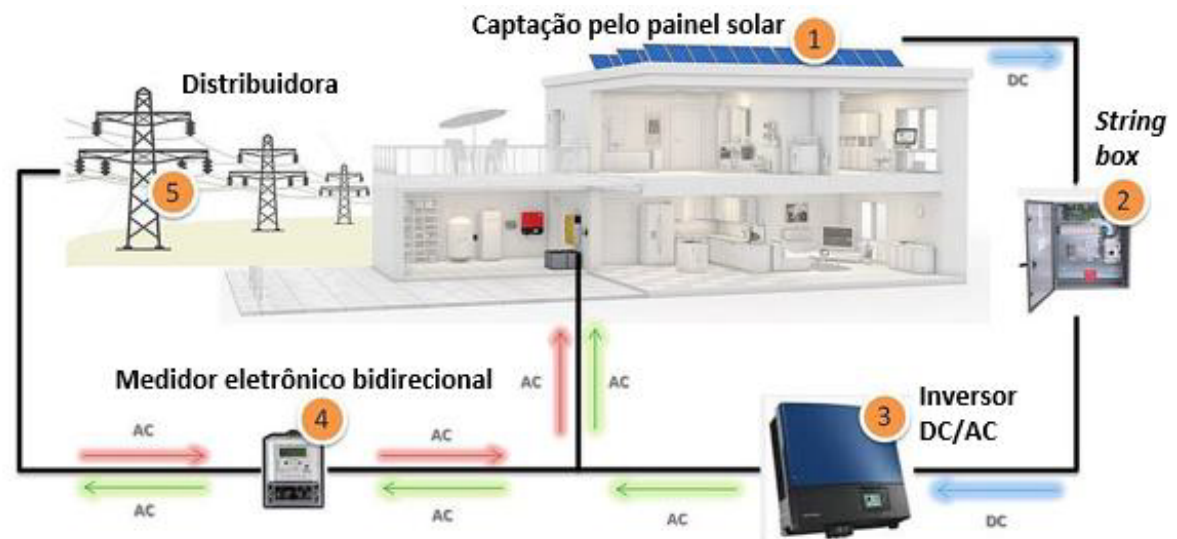
- Este tipo de operação é permitido no Brasil desde 2012 quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012.



Sistema de compensação de energia

Em 17 de abril de 2012 entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, permitindo que o consumidor brasileiro gere sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade.

- Custo de disponibilidade: valor em reais equivalente a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) ou 100 kWh (trifásico).
- 60 meses para consumir o excedente



Estudo da viabilidade econômico-financeira na utilização de sistemas solares fotovoltaicos no Vale do Paraíba

LETÍCIA DINIZ DUIZIT, 2015

Foram levantados os seguintes dados:

- Cidades do Vale do Paraíba (51) e a radiação incidente em cada cidade;
- Orçamento de todo equipamento necessário para a produção de energia elétrica, com capacidade de 250 kWh/mês, de 300 kWh/mês e de 500 kWh/mês;
- Tarifas energéticas das concessionárias do Vale do Paraíba; (Edp Bandeirantes, Elektro, Light S.A., Ampla)
- Cálculo do preço da potência de pico;
- A energia gerada pelo sistema;
- O preço da energia fotovoltaica;
- Valor futuro e valor presente;
- Taxa interna de retorno;
- Payback;

(Set/2015, com dólar a R\$ 3,88)

Tabela 6 – Preço da potência de pico para os três sistemas cotados.

Capacidade (kWh/mês)	Custo total do investimento (R\$) ^[1]	Potência máxima (Wp)	Custo do Watt-pico (R\$/Wp)
500	27.600,00	4000	6,90
300	25.407,19	2430	10,46
250	16.300,00	1500	10,87

Conclusões:

- O *payback*, que é o tempo para o investidor ter o valor do investimento de volta, obteve como resultado por volta do nono ano, ou seja, são necessários **9 anos para recuperar os R\$ 16.000,00** gastos para aquisição do sistema fotovoltaico.
- O valor presente líquido (VPL) que corresponde ao lucro do investimento, que foi estimado em R\$ 20.558,23 ao longo dos 25 anos, que corresponde a um valor de retorno mensal igual a R\$ 68,53.

Aproveitamento da energia solar

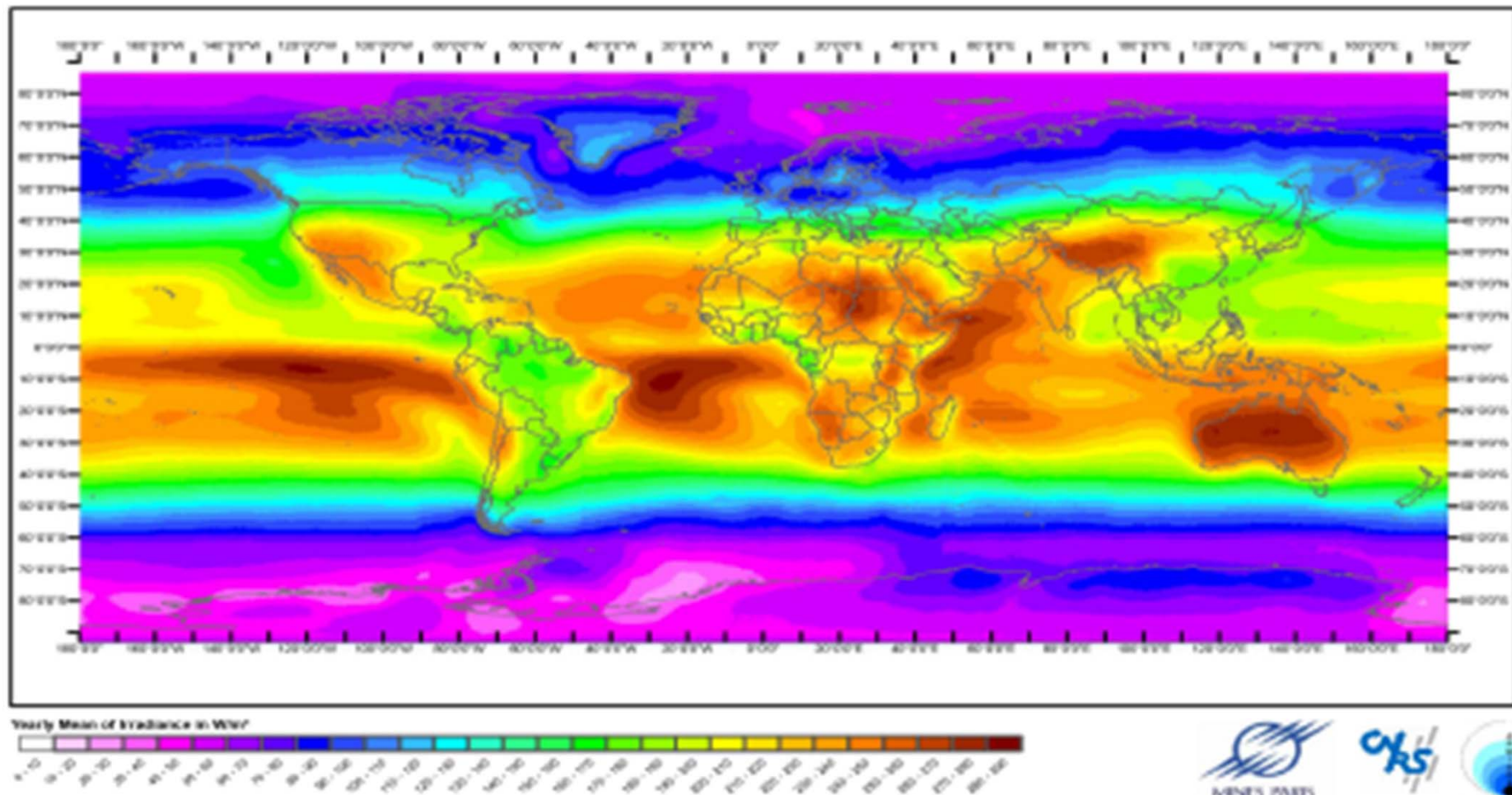
Tabela 1 – Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil de 2008 a 2014.

Fonte Energética	Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (MW)							
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2014 (%)
Usinas Hidrelétricas	74.901	75.484	77.090	78.347	79.956	81.132	84.095	62,80
Usinas Termelétricas	22.999	25.350	29.689	31.243	32.778	36.528	37.827	28,25
PCH	2.490	2.953	3.428	3.896	4.101	4.620	4.790	3,58
CGH	154	173	185	216	236	266	308	0,23
Usinas Nucleares	2.007	2.007	2.007	2.007	2.007	1.990	1.990	1,49
Usinas Eólicas	398	602	927	1.426	1.894	2.202	4.888	3,65
Solar	-	-	1	1	2	5	15	0,01
Total	102.949	106.569	113.327	117.136	120.974	126.743	133.913	100,00

PCH – Pequena Central Hidrelétrica; CGH – Central Geradora.

Fonte: EPE (2014b); EPE (2015).

Averaged Solar Radiation 1990-2004



Atualmente a Alemanha investe em energias solar e eólica, mesmo não possuindo uma incidência de radiação solar tão forte no país. Na tecnologia de energia solar fotovoltaica, a Alemanha detêm uma quota de 44% da capacidade mundial instalada em seu território (PEGELS; LÜTKENHORST, 2014).