

ENERGIA SOLAR

CARLOS DA CONCEIÇÃO CASTILHO NETO

FERNANDO ALMEIDA

LUCAS LIEBEL CAMARGO RIBAS

O QUE É ENERGIA SOLAR?

- É a energia obtida através do efeito fotovoltaico, por meio da conversão da radiação solar em eletricidade, utilizando-se de semicondutores.

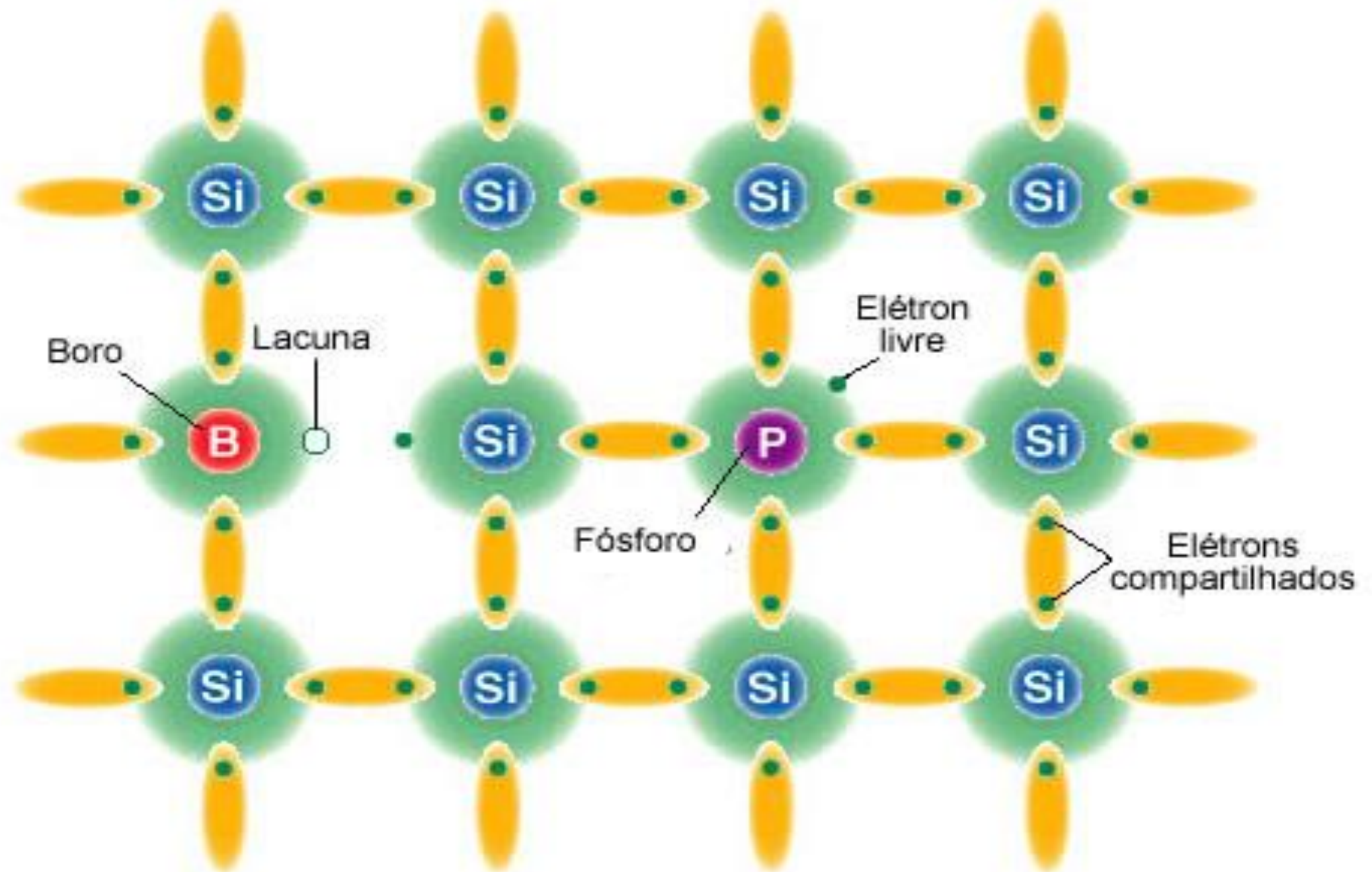


EFEITO FOTOVOLTAICO

- Células fotovoltaicas são fabricadas com semicondutores (materiais com características intermediárias entre um condutor e um isolante).
- O cristal de silício puro é mal condutor elétrico. Para que a condução seja possível, acrescentam-se porcentagens de outros elementos. Este processo denomina-se dopagem.

EFEITO FOTOVOLTAICO

- A partir da dopagem do silício com o arsênio ou o fósforo (família 5A), formam-se ligações covalentes entre quatro elétrons e um fica livre, tornando possível a passagem de corrente elétrica (silício tipo N).
- Realizando a dopagem com boro ou gálio (família 3A) ao silício, é obtido um material com falta de elétrons (lacunas) conhecido como silício tipo P.



EFEITO FOTOVOLTAICO

- A célula solar é composta por uma camada fina de material do tipo N e outra mais espessa de material do tipo P.
- Ao serem unidas formando uma região PN, é formado um campo elétrico devido aos elétrons livres do silício tipo N que ocupam a lacunas do silício tipo P.

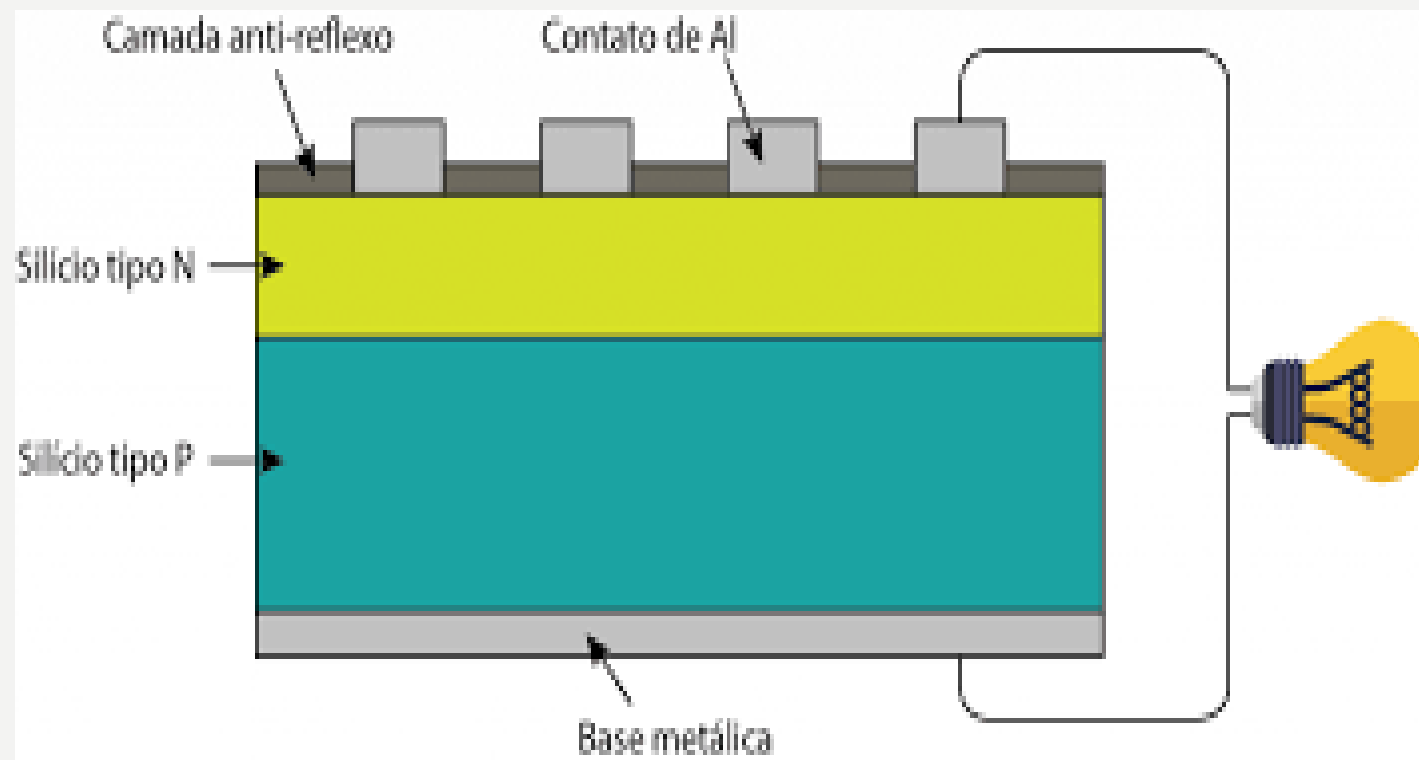
EFEITO FOTOVOLTAICO

- Ao incidir luz sobre a célula fotovoltaica, os fótons fornecem energia aos elétrons, e devido ao campo elétrico gerado pela junção PN, os elétrons são fluem da camada P para a camada N, enquanto as lacunas fluem da camada N para a camada P.
- Fechando-se o circuito com um condutor externo, é gerada uma corrente elétrica, que é mantida enquanto os fótons permanecerem excitando os elétrons.

EFEITO FOTOVOLTAICO

- Para conectar os condutores externos, são adicionados contatos que diminuem a eficiência da célula, pois causam reflexão e sombra.
- É possível reduzir as perdas por reflexão ao diminuir a quantidade de contatos frontais, contudo, quanto menos condutores, maior o número de elétrons recombinados com os átomos de silício ao perderem a energia adquirida que é transformada em calor, tornando a célula menos eficiente.

EFEITO FOTOVOLTAICO



EFEITO FOTOVOLTAICO

- É importante destacar que as células de silício absorvem a radiação em uma estreita faixa do espectro da radiação.
- Tanto a energia de fótons com frequências muito altas como a energia de fótons com frequências muito baixas fazem com que haja liberação de energia em forma de calor, o que diminui a eficiência da célula.

CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

- Consideradas células da primeira geração
- Fabricadas cada uma a partir de um cristal puro de silício
- São as mais eficientes entre as células de silício
- São também são as mais caras



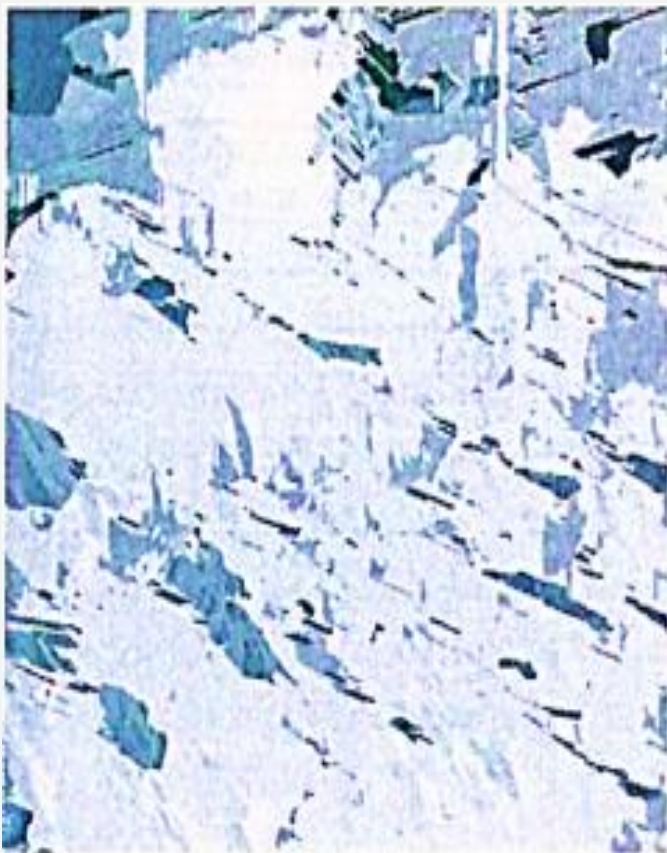
CÉLULAS DE SILÍCIO MONOCRISTALINO

- Eficiência entre 15% e 22%
- Células obtidas em forma de pastilhas finas (entre 0,3 e 0,5 mm de espessura)
- Material mal aproveitado durante o processo
- Painéis desse tipo de célula possuem cerca de 30 anos de vida útil

CÉLULAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO

- Fundição de vários cristais de silício em um bloco
- Eficiência entre 14% e 20%
- Mais baratas que as de silício monocristalino
- A quantidade residual de silício menor em comparação com o monocristalino
- Vida útil dos painéis policristalinos superior a 30 anos

CÉLULAS DE SILÍCIO POLICRISTALINO



PAINÉIS DE FILME FINO

- Deposição de camadas finas de material fotovoltaico sobre um substrato
- Camadas muito finas de filme são suficientes para a conversão da radiação solar
- Custo reduzido para a dopagem do material do filme

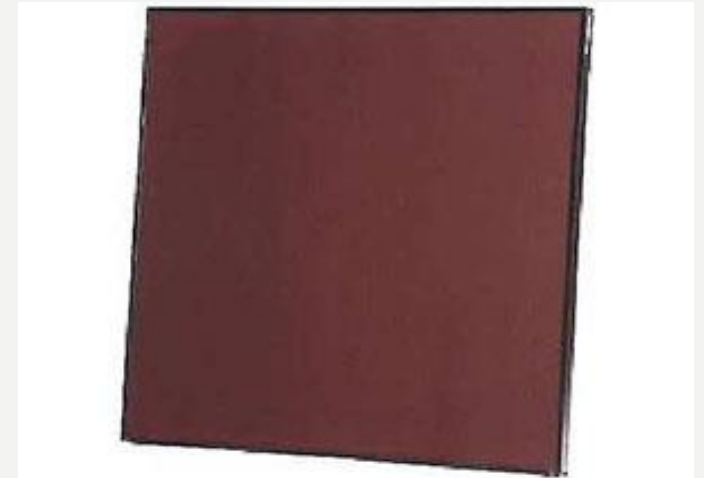


PAINÉIS DE FILME FINO

- Os painéis de filme fino são categorizados pelo respectivo material fotovoltaico
- Tempo de vida de cerca de 10 anos, em geral
- Eficiências médias entre 7 e 13%, algumas tecnologias atingindo 16%

PAINÉIS DE SILÍCIO AMORFO

- Historicamente possui baixa eficiência
- Utiliza apenas 1% do silício de células de silício cristalino
- Nova técnica chamada "empilhamento" resulta num aumento da eficiência (entre 6 e 10%)



PAINÉIS DE COBRE, ÍNDIO E GÁLIO SELENETO (CIGS)

- Eficiência atual entre 10 e 14%
- Grande potencial em termos de eficiência
- Custo elevado do índio

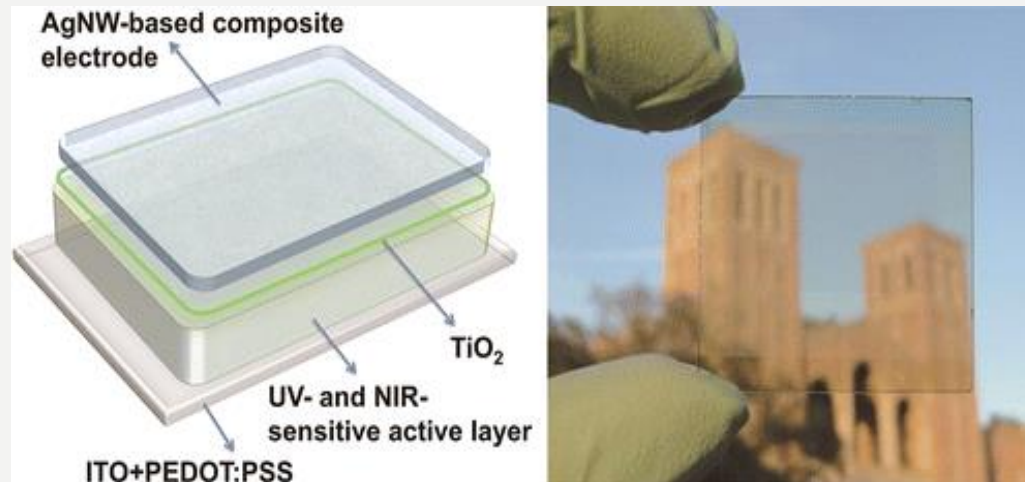


CÉLULAS SOLARES TRANSPARENTES

- Produz energia absorvendo principalmente luz não visível
- Células 66% transparentes ao olho humano
- Constituídas por um plástico que converte luz infravermelha em corrente elétrica

CÉLULAS SOLARES TRANSPARENTES

- O condutor é feito de nanopartículas de prata e de dióxido de titânio
- Têm potencial para ser usadas em janelas inteligentes ou eletrônicos portáteis



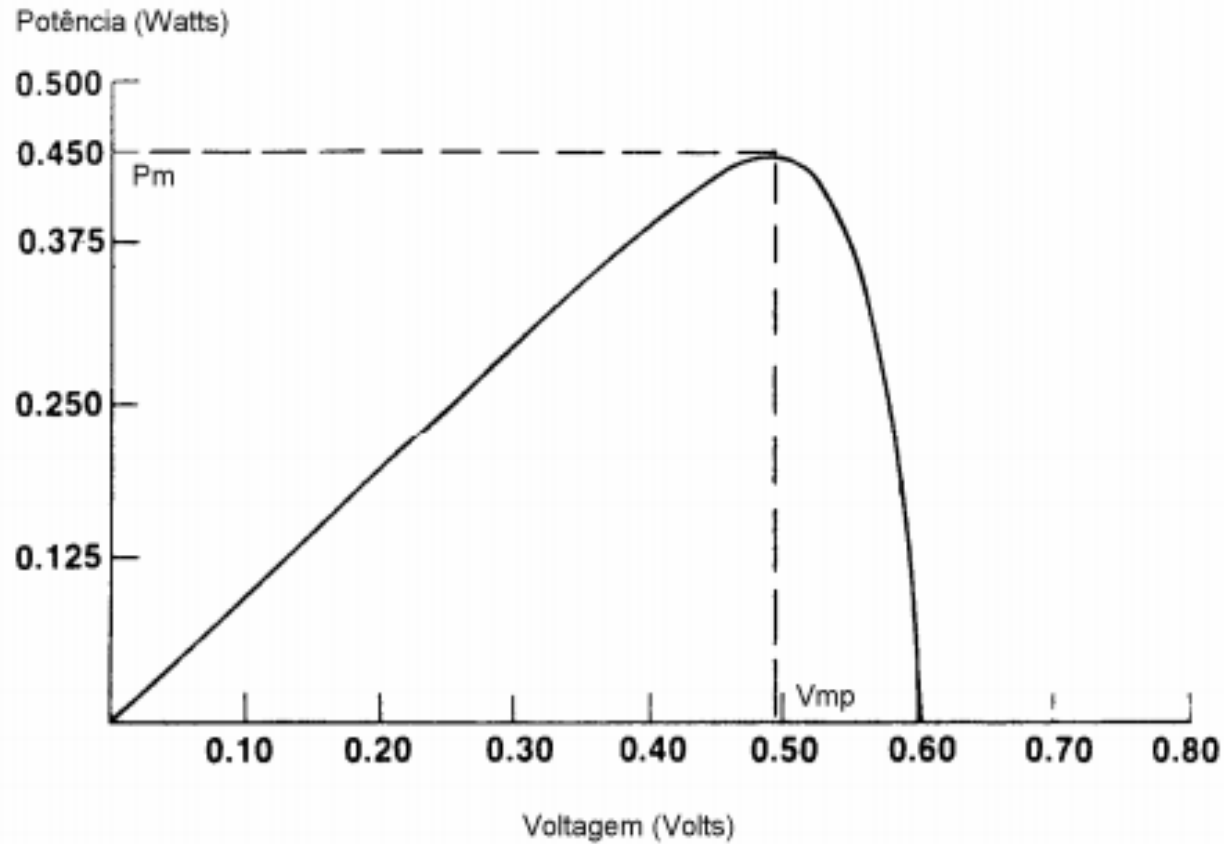
COMPARATIVO ENTRE EFICIÊNCIAS

Material	Eficiência		
	Máxima Teórica	Em Laboratório	Produção em Série
Silício Mono	24,7%	18%	14%
<u>Silício Poli</u>	19,8%	15%	13%
Silício Amorfo	15%	10,5%	7,5%
CIGS	18,8%	14%	10%

PERDAS DA CÉLULA ELETROVOLTAICA

100%	Irradiação Solar Total
-3,0%	Reflexão e sombreamento dos contatos frontais
-23,0%	Fótons com energia insuficiente na irradiância de ondas compridas
-32,0%	Fótons com energia excedente na irradiância de ondas curtas
-8,5%	Recombinação de elétrons
-20,0%	Gradiente elétrica, especialmente na região do campo elétrico
-0,5%	Resistência em série (perdas térmicas na condução elétrica)
= 13,0%	Energia elétrica utilizável

PAINÉIS SOLARES



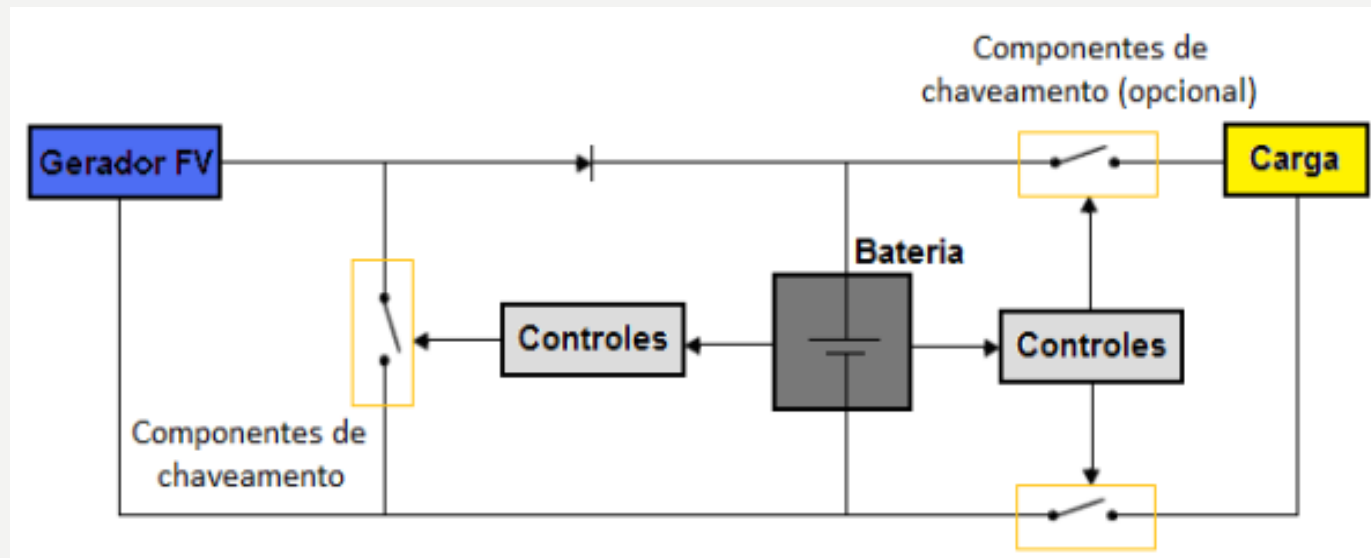
Curva típica P_xV da célula de silício monocristalino

BATERIAS

Tecnologia	Eletrólito	Densidade Energética [Wh/kg]	Densidade Energética [Wh/L]	Eficiência η_{wh} [%]	Vida útil [anos]	Vida cíclica [ciclos]	Temperatura de operação		Aplicações típicas (exemplos)
							Carga padrão [°C]	Descarga [°C]	
Chumbo ácido ⁷ (Pb-ácido)	H ₂ SO ₄	20–40	50–120	80–90	3–20	250–500	–10 a +40	–15 a +50	Uso estacionário, tração, automotiva
Níquel-Cádmio (NiCd)	KOH	30–50	100–150	60–70	3–25	300–700	–20 a +50	–45 a +50	Mesmo tipo de aplicações das baterias chumbo-ácido, ferramentas, veículos elétricos
Níquel-hidreto metálico (NiMH)	KOH	40–90	150–320	80–90	2–5	300–600	0 a +45	–20 a +60	<i>Notebooks</i> , celulares, câmeras fotográficas, veículos elétricos e híbridos, brinquedos
Íon de Lítio (Li-ion, Li-polímero)	Polímeros orgânicos	90–150	230–330	90–95	–	500–1000	0 a +40	–20 a +60	<i>Notebooks</i> , celulares, filmadoras, <i>smart cards</i> , veículos elétricos e híbridos

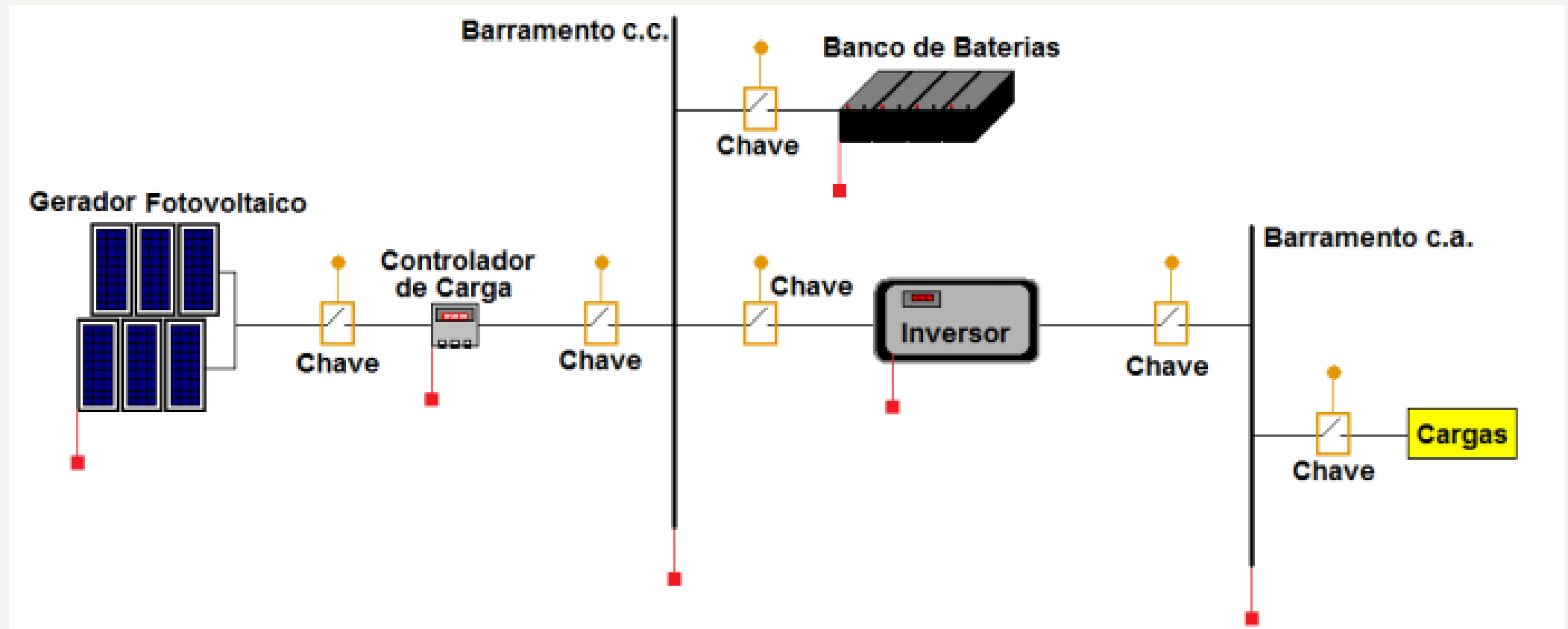
CONTROLADORES DE CARGA

- Circuitos para proteger e prolongar a vida útil das baterias

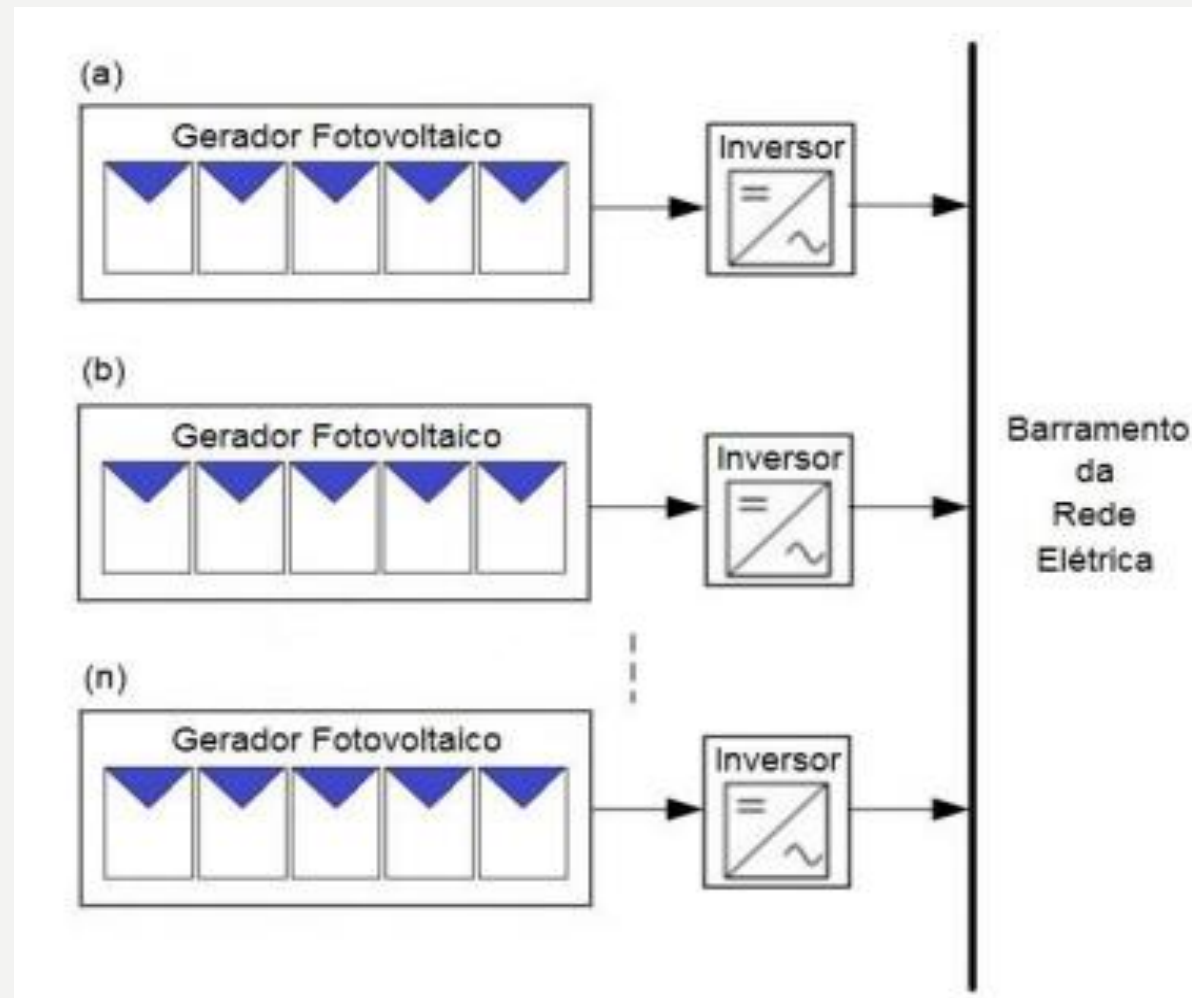


Controlador paralelo

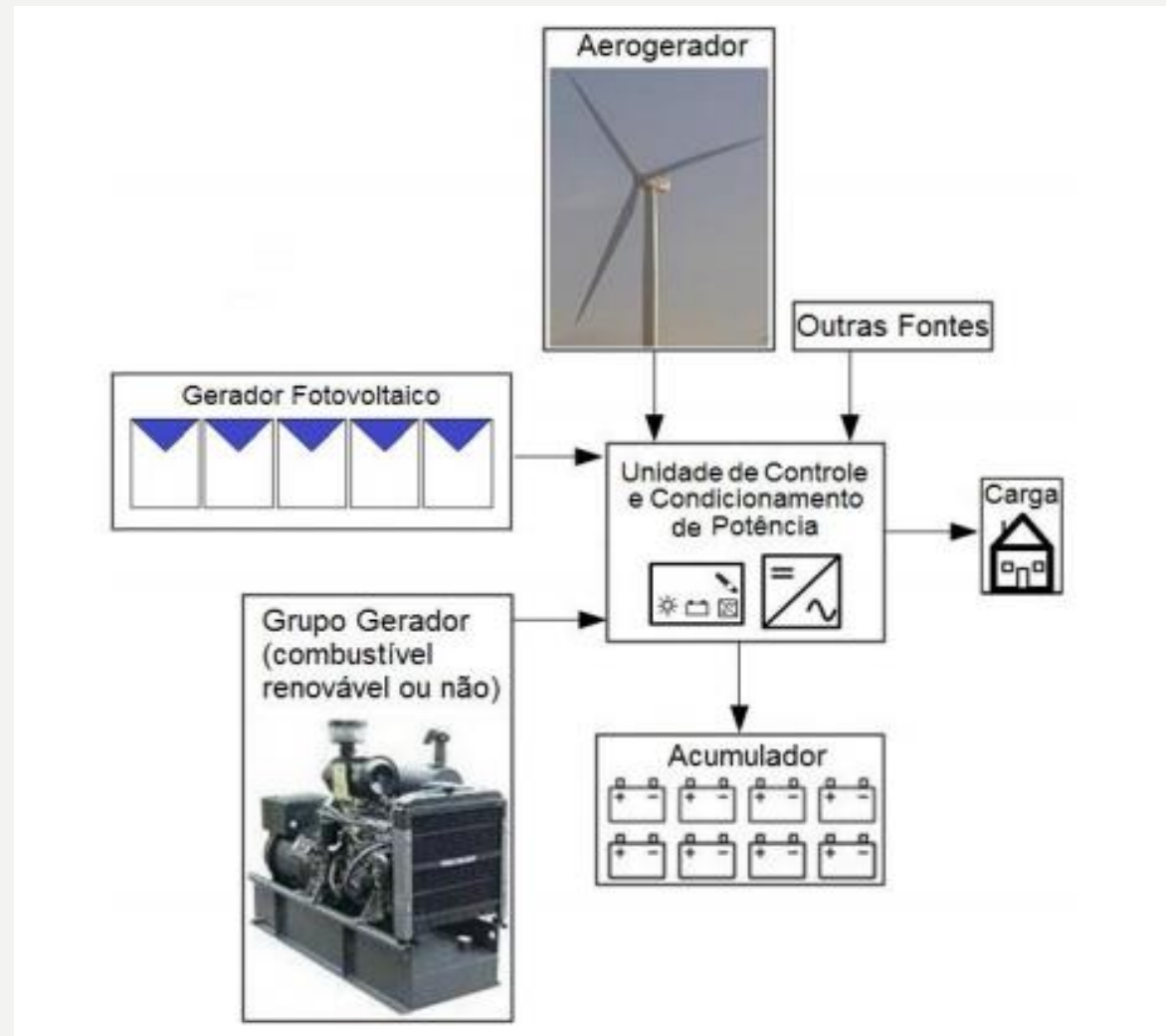
SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO



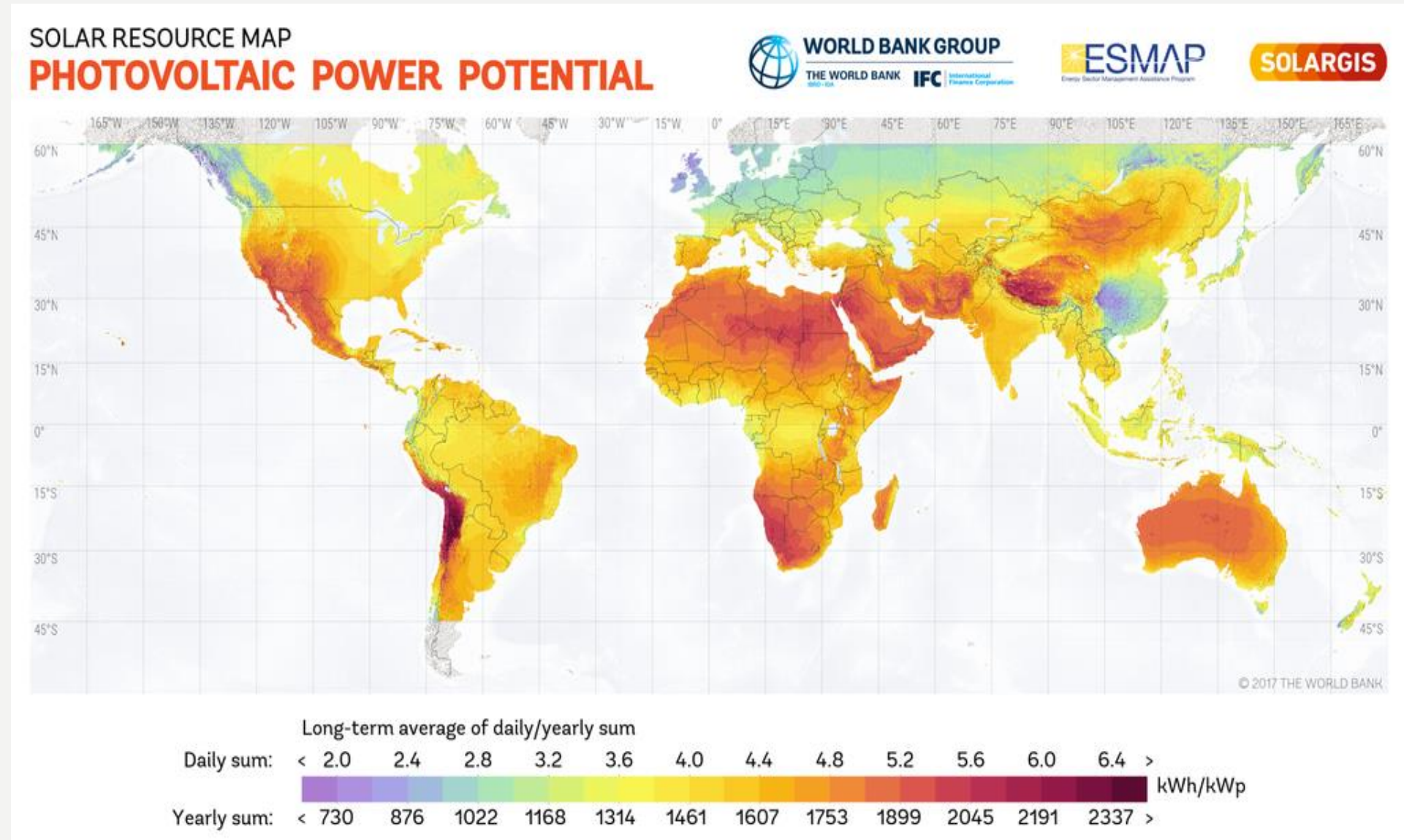
SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE



SISTEMA HÍBRIDO



POTENCIAL SOLAR MUNDIAL



O Mercado Fotovoltaico no Mundo

O Brasil instalou 1,2 GW em 2018, totalizando 2,4 GW de capacidade instalada acumulada.



Quais países investiram mais em energia solar fotovoltaica em 2018?

	1º China	45,0 GW
	2º Índia	10,8 GW
	3º USA	10,6 GW
	4º Japão	6,5 GW
	5º Austrália	3,8 GW
	6º Alemanha	3,0 GW
	7º México	2,7 GW
	8º Coreia do Sul	2,0 GW
	9º Turquia	1,6 GW
	10º Holanda	1,3 GW

Quais países lideram o mundo em potência acumulada?

	1º China	176,1 GW
	2º EUA	62,2 GW
	3º Japão	56,0 GW
	4º Alemanha	45,4 GW
	5º Índia	32,9 GW
	6º Itália	20,1 GW
	7º Reino Unido	13,0 GW
	8º Austrália	11,3 GW
	9º França	9,0 GW
	10º Coreia do Sul	7,9 GW

Fonte: Snapshot of Global PV Markets, IEA PVPS, 2019.

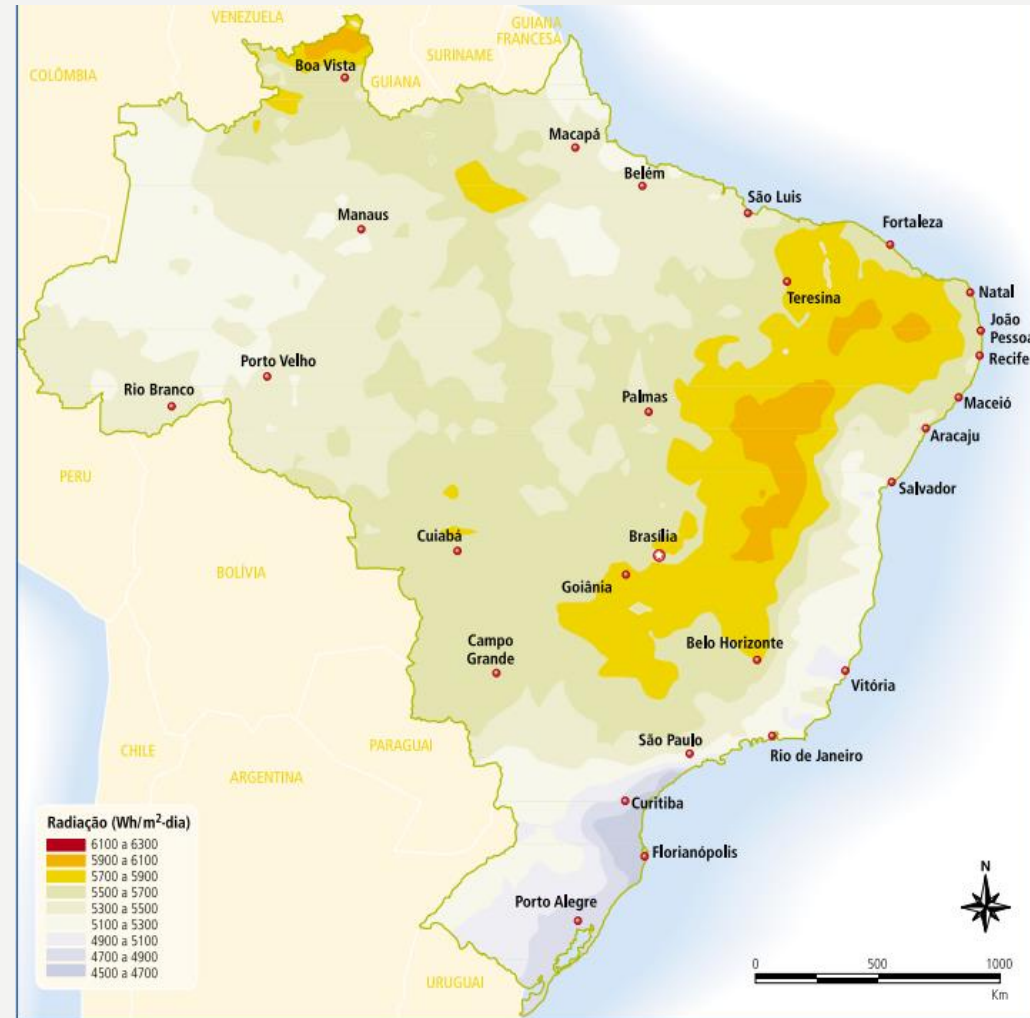
Maior fazenda de energia solar do mundo é inaugurada nos Emirados Árabes Unidos

Com 3,2 milhões de painéis, o Noor Abu Dhabi consegue produzir até 1,18 gigawatts

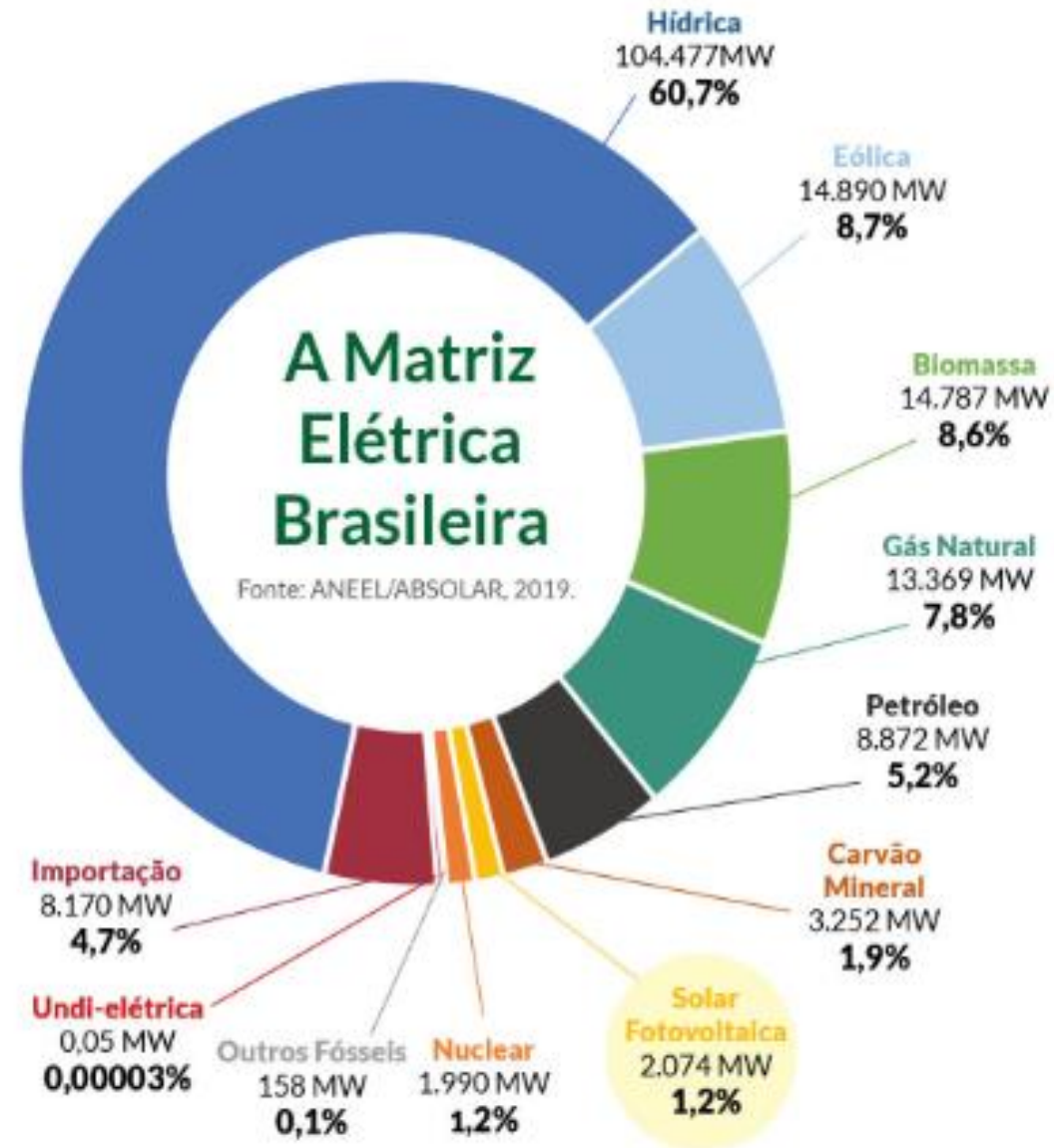
Tadeu Mattos | 01/07/2019 às 13:50:00 | 4



NO BRASIL



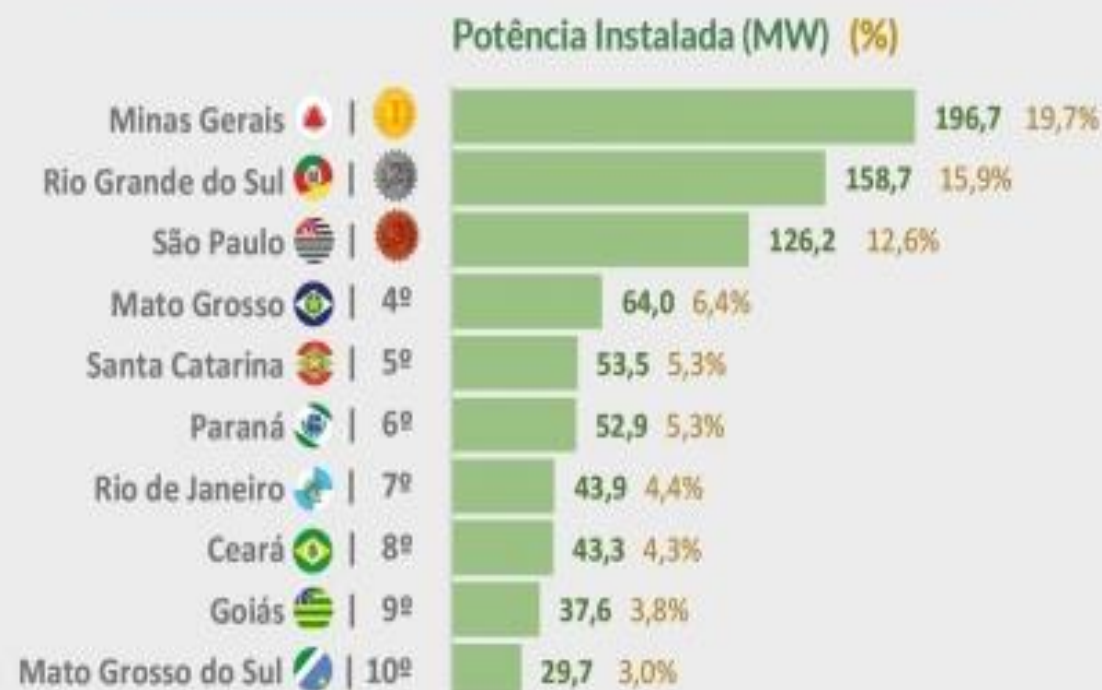
Radiação solar global diária - média anual típica



Geração Distribuída

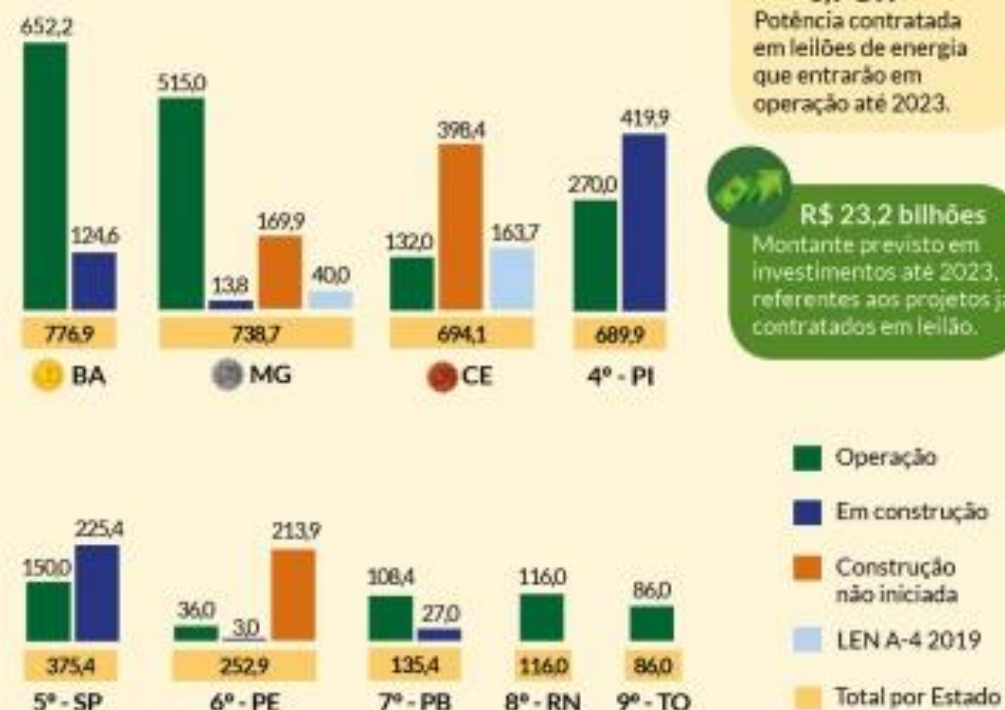
Ranking Estadual

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2019.



Geração Centralizada

Potência instalada (MW) e status da geração centralizada solar fotovoltaica por estado:



Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2019.

MAIORES USINAS DE ENERGIA SOLAR DO BRASIL

- Usina Solar Pirapora – Pirapora – MG – 321 Megawatts
- Usina Solar Nova Olinda – Ribeira do Piauí – PI – 210 Megawatts
- Usina Solar Ituverava – Tabocas do Brejo Velho – BA – 196 Megawatts
- Usina Solar Bom Jesus da Lapa – Bom Jesus da Lapa – BA – 158 Megawatts
- Usina Solar Guaimbê – Guaimbê – SP – 150 Megawatts
- Usina Solar Apodi – Quixeré – CE – 132 Megawatts

COMPLEXO SOLAR PIRAPORA

- O Complexo Solar Pirapora está instalado na cidade homônima localizada no estado de Minas Gerais, e agrupa mais de um milhão de placas solares com capacidade de geração de 321 MW. Trata-se na verdade de um complexo de 11 usinas que ocupam uma área equivalente a 1.500 campos de futebol.



VANTAGENS DA ENERGIA SOLAR

- É totalmente renovável
- Não faz barulho e não polui
- Requer manutenção mínima
- O sistema dura entre 15 e 30 anos
- Fácil de instalar
- Pode ser usada em áreas remotas onde não existe rede de energia

DESVANTAGENS DA ENERGIA SOLAR

- Não pode ser usada durante a noite
- Energia suplementar pode ser necessária em áreas com pouca luz solar
- Alto investimento inicial
- Para armazenar a energia solar é necessário o uso de baterias o que pode encarecer o custo do sistema fotovoltaico como um todo

DIMENSIONAMENTO

Cálculos:

O consumo médio mensal observado dos últimos 12 meses foi de:

$$C_m = 214 \text{ kWh}$$

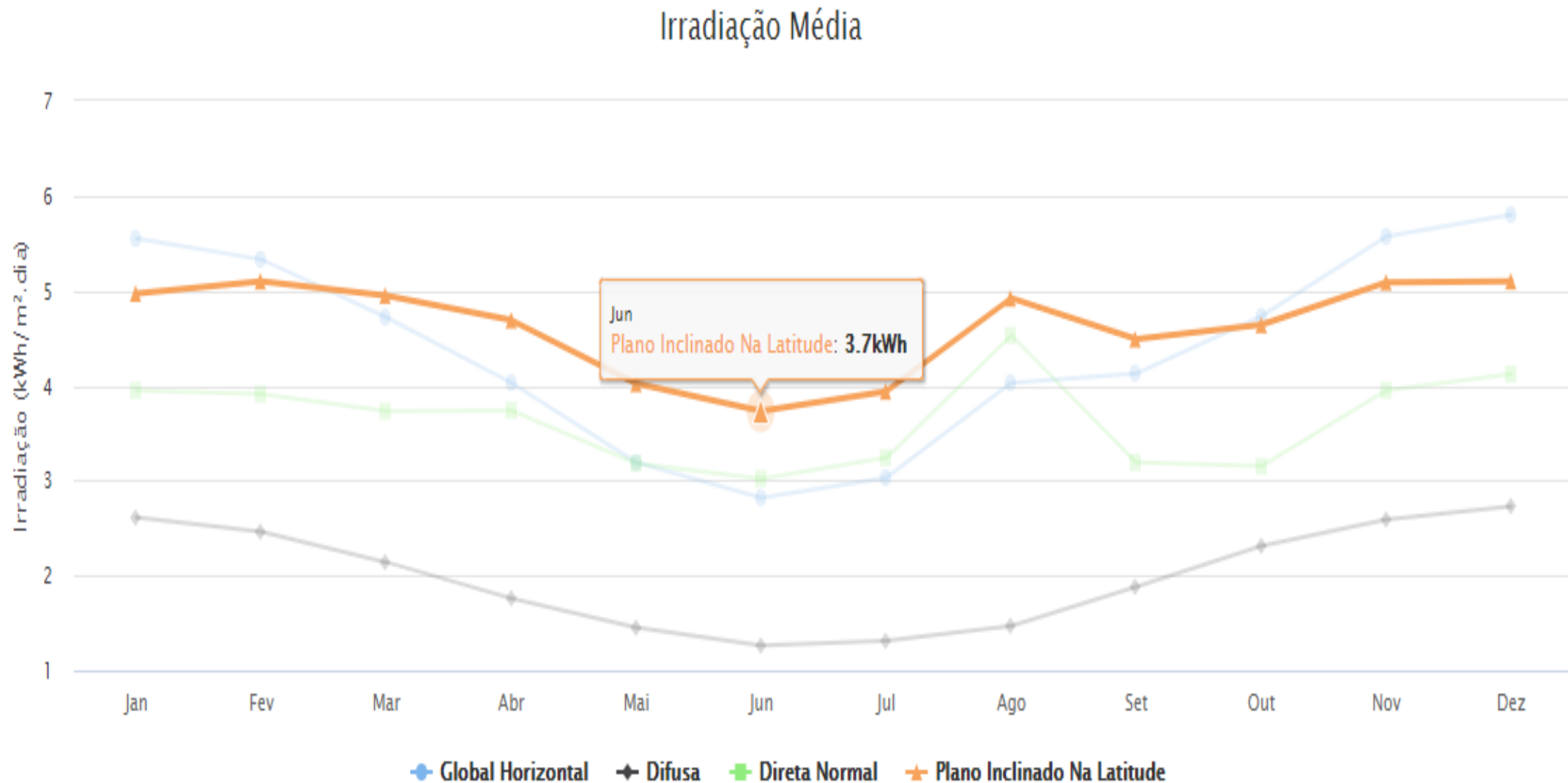
Descontando 50KWh (consumo mínimo referente ao padrão bifásico, ou seja, independente de haver consumo ou não pela unidade consumidora esta quantidade de energia é cobrada)

$$C_m = 214 - 50 = 164 \text{ KWh}$$

O consumo diário é dado pela equação:

$$C_d = 164 \text{ KWh} / 30 = 5,466 \text{ kWh /dia}$$

DIMENSIONAMENTO



DIMENSIONAMENTO

Considerando que o entre as 11h e as 13h em dias ensolarados a irradiação alcança níveis próximos a 1KWh/m² e que no restante do dia valores inferiores a este podem ser obtidos, consegue-se calcular a quantidade de horas diárias de geração de energia.

$$\text{NHSol} = 3,70 / 1 = 3,7\text{h}$$

Assim a demanda prevista para ser atendida pelos painéis é de:

$$D = 5,46 \text{ KWh} / 3,7 = 1,48\text{KW}$$

Assim serão utilizados 6 painéis de 260W totalizando uma potência de 1,56KW. Nota-se também que para se obter o melhor desempenho do sistema "on-grid" os painéis devem ser apontados para o norte geográfico e com a inclinação igual a latitude do local, caso o local de instalação dos painéis possua regiões de sombreamento, pode-se considerar a possibilidade de aumentar a potência dos painéis dimensionada.

Vale destacar que o dimensionamento dos painéis não leva em consideração a demanda de pico ou a demanda instalada, pelo fato de se tratar de um sistema "on-grid", horários que ocorrem uma maior demanda, por exemplo 7KW referentes ao uso de um chuveiro elétrico, a rede de energia irá suprir a demanda restante do qual os painéis não conseguem gerar, no caso 5,52 KW.

DIMENSIONAMENTO

Com base na seguinte tabela abaixo consegue-se notar a baixa eficiência que infelizmente os painéis solares ainda possuem, na opção que utilizaremos (260W), sua eficiência é de apenas 16%, isso que em média a dimensão de um painel é aproximadamente 1,5m².

CARATERÍSTICAS ELÉTRICAS

Parâmetros elétricos para STC

Tipo de módulo			YLxxxC-30b (xxx=P _{max})				
			280	275	270	265	260
Potência de saída	P _{max}	W	280	275	270	265	260
Tolerância	ΔP _{max}	W	0 / + 5				
Eficiência do módulo	η _m	%	17,2	16,9	16,6	16,3	16,0
Tensão em P _{max}	V _{mpp}	V	31,3	30,9	30,5	30,1	29,7
Corrente em P _{max}	I _{mp}	A	8,96	8,91	8,85	8,79	8,74
Tensão em circuito aberto	V _{oc}	V	39,1	38,8	38,6	38,3	38,1
Corrente de curto-circuito	I _{sc}	A	9,50	9,47	9,43	9,37	9,35

STC: 1000 W/m² irradiância, temperatura do módulo de 25° C, distribuição espectral AM1.5gr de acordo com a norma EN 60904-3.
Redução média de eficiência de 1,9% em irradiância de 200 W/m² de acordo com EN 60904-1.

INPUT DATA		GALVO 1.5-1	GALVO 2.0-1	GALVO 2.5-1	GALVO 3.1-1
Recommended PV Power (kWp)		1.2 - 2.4	1.6 - 3.2	2.0 - 3.8	2.5 - 4.5
Max. usable input current	240 V	13.4 A	17.9 A	16.1 A	20.0 A
	208 V	13.4 A	17.0 A	16.1 A	18.7 A
Max. array short circuit current		16.7 A	22.4 A	20.1 A	25.0 A
Nominal input voltage		260 V		330 V	
Min./Max. input voltage		120 V / 420 V		165 V / 550 V	
DC startup voltage		140 V		185 V	
MPP Voltage Range		120 V - 335 V		165 V - 440 V	
Admissible conductor size (DC)		AWG 14 to AWG 6 - CU / AWG 6 - AL - solid			
Number of DC input terminals		3x DC+ and 3x DC- screw terminals for solid copper or aluminium and stranded / fine stranded copper			

OUTPUT DATA		GALVO 1.5-1	GALVO 2.0-1	GALVO 2.5-1	GALVO 3.1-1
AC nominal output power		1,500 VA	2,000 VA	2,500 VA	3,100 VA
Max. output power		1,500 VA	2,000 VA	2,500 VA	3,100 VA
Max. continuous output current	240 V	6.3 A	8.3 A	10.4 A	12.9 A
	208 V	7.2 A	9.1 A	12.0 A	14.1 A
Recommended OCPD/AC breaker size	240 V	10.0 A	15.0 A	15.0 A	20.0 A
	208 V	10.0 A	15.0 A	15.0 A	20.0 A
Admissible conductor size (AC)		AWG 14 to AWG 6 - CU / AWG 6 - AL - solid			
Max. output overcurrent protection		20 A			
Grid connection		208 / 240 V			
Frequency		60 Hz			
Frequency range		45 - 65 Hz			
Total harmonic distortion		< 4 %			
Power factor range		0.85 - 1 ind./cap			

*The term Wi-Fi is a registered trademark of the Wi-Fi Alliance.

Vale destacar uma informação muito importante do inversor o MPP Voltage Range, geração a plena carga, comumente conhecido como o seguidor de máxima potência do inversor, tal informação informa que tipo de ligação dos painéis deve ser feita, em série ou em paralelo a fim de manter a tensão gerada dentro desta faixa no caso do modelo 2.0-1 a geração deve estar em a faixa de 120V – 335V.

Como a tensão de operação a plena carga de cada painel é de 29,7V, pode-se ligar todos os seis painéis em série, obtendo uma tensão de entrada no inversor de:

$$\text{Vin} = 6 * 29,7 = 178,2\text{V}$$

A tensão de circuito aberto do painel (38,1V) é maior que a plena carga, e também deve ser menor que a máxima permitida de entrada do inversor (420V) logo verifica-se:

$$\text{Vin} = 6 * 38,1 = 228,6\text{V}$$

E a corrente máxima de entrada do inversor é de 17A e a corrente gerada pelos painéis é de 8,74 A, logo todos os parâmetros estão dentro dos limites requeridos pelo inversor.

CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Temperatura nominal da célula	NOCT	°C	46 +/- 2
Coeficiente de temperatura para P_{max}	γ	%/°C	-0.42
Coeficiente de temperatura para V_{oc}	$\beta_{V_{oc}}$	%/°C	-0.30
Coeficiente de temperatura para I_{sc}	$\alpha_{I_{sc}}$	%/°C	0.04
Coeficiente de temperatura para V_{mpp}	$\beta_{V_{mpp}}$	%/°C	-0.40

Na condição de menor temperatura, a máxima tensão possível nos painéis ocorrerá na condição de circuito aberto logo:

$$(-0,30[\%/C]/100) \times 38,1V \times (10C - 25C) = 1,7145 V$$

Como temos 6 módulos em serie temos:

$$V_{oc} = (38,1 + 1,7145) * 6 = 238,89V$$

Na condição de maior temperatura, a mínima tensão possível nos painéis ocorrerá na condição de plena carga, logo:

$$(-0,40[\%/C]/100) \times 29,7V \times (80C - 25C) = -6,534V$$

$$V_{oc} = (29,7 - 6,534) * 9 = 139V$$

A stringbox será a interface entre os painéis e o inversor para proteção dos painéis no lado DC do Inversor. As figuras 5 e 6 mostram em detalhes este equipamento. Este quadro contém:

- 1 par de porta-fusível com 1 par de fusíveis 10A já instalado
- 1 chave seccionadora corrente contínua 16 A 660V
- 1 DPS corrente contínua para os polos positivo e negativo
- Caixa elétrica IP40 (instalação interna)
- 5 prensa-cabos já instalados na caixa para passagem dos cabos (entrada, saída e terra)
- Suporta 1 string de até 12 painéis fotovoltaicos
- Caixa IP40 (instalação interna)
- Equipamentos montados em trilho DIN



CUSTO

Inversor Galvo 2.0-1	R\$ 4.700,00
StringBox	R\$ 1.290,00
6 Painéis 260W - Yingli	R\$ 5.800,00
Mão de Obra, Estrutura e Projeto	R\$ 5.000,00
Total	R\$ 16.790,00

Considerando o preço médio de 0,785103 R\$/ kWh encontrado na tarifa de energia da residência, e o a geração média de 164kWh, o valor médio mensal da fatura, que será gerado pelo sistema implementado é:

$$\Delta E = 164 \times 0,785103 = \text{R\$ } 128,57$$

Assim o tempo de retorno simples é:

$$\text{TRS} = 16.790,00 / 128,57 = 130 \text{ meses} = 10,88 \text{ anos}$$

A taxa líquida calculada considerando a taxa de juros de 10%a.a e um aumento do custo da tarifa de energia a 3%a.a é:

$$Il = \left(\frac{1 + 0,10}{1 + 0,03} \right) - 1 = 0,06796 = 6,796\%a.a$$

Assim o tempo de retorno capitalizado fica:

$$Trc = \frac{\log\left(\frac{128,57 * 12}{(128,57 * 12) - (16790 * 0,06796)}\right)}{\log(1 + 0,06796)} = 20 \text{ anos}$$

GARANTIAS E VIDA ÚTIL DOS COMPONENTES

De acordo com os dados do fabricante do inversor Fronius, a garantia contra defeitos de fabricação do aparelho é de 5 anos, e o tempo estimado de vida útil entre 10 e 15 anos. O fabricante do painel solar oferece uma garantia de 10 anos contra defeito de fabricação e estima que em 25 anos de uso, as placas percam 20% da potência máxima.

China inaugura estrada solar e promete reduzir os índices de poluição no país



- 2km de estrada capaz de gerar 1 milhão de KWh por ano;
- O piso da nova estrada tem 3 camadas: uma isolante na parte inferior, uma de painéis fotovoltaicos no centro, que transformam a luz em energia, e sobre elas o concreto transparente.

Rodovia de Energia Solar é um fracasso na França



- Local de instalação: a região da Normandia, onde os painéis para teste foram instalados, costumam ter apenas 44 dias de sol forte;
- A quantidade de energia gerada foi de 150 mil kWh, caindo para 78 mil em 2018 e 38 mil no início de 2019.



- Garantia infinita;
- 3x mais resistente que uma telha convencional;
- US\$ 22/m²

China planeja usina solar no espaço



- A instalação pode gerar em tese energia em 99% do tempo, com até seis vezes mais eficiência do que uma usina em terra;
- A proposta chinesa é enviar a eletricidade gerada pela usina por meio de micro-ondas ou até mesmo raios laser para uma base na Terra, e distribuí-la.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. **Transparent solar cells for windows that generate electricity**. [S. l.], 1 ago. 2012. Disponível em: <https://phys.org/news/2012-08-transparent-solar-cells-windows-electricity.html>. Acesso em: 1 jul. 2019.
- MACHADO, Carolina T.; MIRANDA, Fabio S. **Energia Solar Fotovoltaica: Uma Breve Revisão**, [S. l.], p. 126-143, 14 out. 2014. Disponível em: <http://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/664>. Acesso em: 30 jun. 2019.
- **CÉLULA fotovoltaica transparente pode transformar janela em painel solar**. [S. l.], 6 nov. 2017. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/celula-fotovoltaica-transparente-pode-transformar-janela-em-painel-solar.html>. Acesso em: 1 jul. 2019.
- DO NASCIMENTO, Cássio Araújo. **PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA CÉLULA FOTOVOLTAICA**. 2004. Monografia (Pós-Graduação Lato-Sensu em Fontes alternativas de energia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2004. Disponível em: https://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf. Acesso em: 1 jul. 2019.
- BRAGA, Renata Pereira. **Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações**. 2008. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/7372>. Acesso em: 1 jul. 2019.
- DI SOUZA, Ronilson. **Célula Fotovoltaica – O Guia Técnico Absolutamente Completo**. [S. l.], 23 fev. 2017. Disponível em: <https://blog.bluesol.com.br/celula-fotovoltaica-guia-completo/>. Acesso em: 2 jul. 2019.

REFERÊNCIAS

- PINTO, João Tavares, GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaicos**, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf. Acesso em: 28 jun. 2019.