



**Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação**

Universidade Federal de Goiás

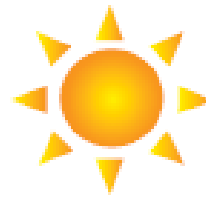
Uso e Desafios da Energia Solar

ENERGIA

O QUE É ENERGIA?

- Propriedade da matéria e da radiação que manifesta-se como a capacidade de produzir trabalho
- Diferentes formas: cinética, potencial, térmica, elétrica, eólica, eletromagnética, química, nuclear, agregação da matéria, acústica, radiante, explicam diferentes fenômenos

Fontes primárias de energia



Radiação solar directa

Radiação solar indirecta

Captação Térmica

Captação Fotónica

Eólica

Ondas

Hidráulica

Biomassa

Energia solar
Térmica

Captação Fotovoltaica

Captação Fotoquímica

Energia solar
Fotovoltaica

Biomassa

Fotoquímica

Energias Renováveis, Limpas e Armazenáveis

- Estes conceitos **não são sinônimos** e muitas vezes são confundidos.
- **Energia Renovável** → seu ciclo energético renova-se várias vezes ao longo do período da vida de um ser humano (máximo de 100 anos). Normalmente, as energias renováveis possuem ciclos anuais. Exemplos: biomassa, hidroeletricidade, energia solar,
- **Energia Limpa** → a rigor, nenhuma energia é limpa, pois todas as formas de energia têm impactos ambientais. As ditas energias limpas são aquelas que apresentam a **menor** contaminação ambiental **possível**. Um critério de classificação frequentemente utilizado no mundo tem sido os **níveis de emissão de carbono** (CO₂, CO, CH₄) de uma dada fonte de energia, embora inúmeros outros critérios possam ser considerados. Exemplos: solar, eólica,

Energias Renováveis, Limpas e Armazenáveis

- Os sistemas elétricos de energia requerem necessariamente uma base de energia despachável de forma que o sistema de geração possa enviar energia (despachar) e atender à demanda da carga sem que ocorra colapso (falta ou excesso).
- **Energia Armazenável ou Despachável** → este termo denomina as fontes de energia que permitem armazenamento (reserva ou acúmulo) longo do tempo.
- A energia solar heliotérmica de altas temperaturas (**CSP**) ainda é uma fonte alternativa de calor e a **energia solar fotovoltaica já é uma fonte convencional** de energia no mundo. Energias Solar Térmica e Fotovoltaica são formas de energia **renováveis, limpas e intermitentes**.

ENERGIA SOLAR PARA PRODUÇÃO DE CALOR

- Coletores Solares → Baixas temperaturas < 100 °C



- Aplicações: Aquecimento de água para banho, vestiários, torneiras, cozinhas piscinas, processos de baixa temperatura

- Concentradores Solares (*Concetrating Solar Power, CSP*) → Altas temperaturas de 100 °C até 600 °C

CSP Calhas Parabólicas
(Solar trough)

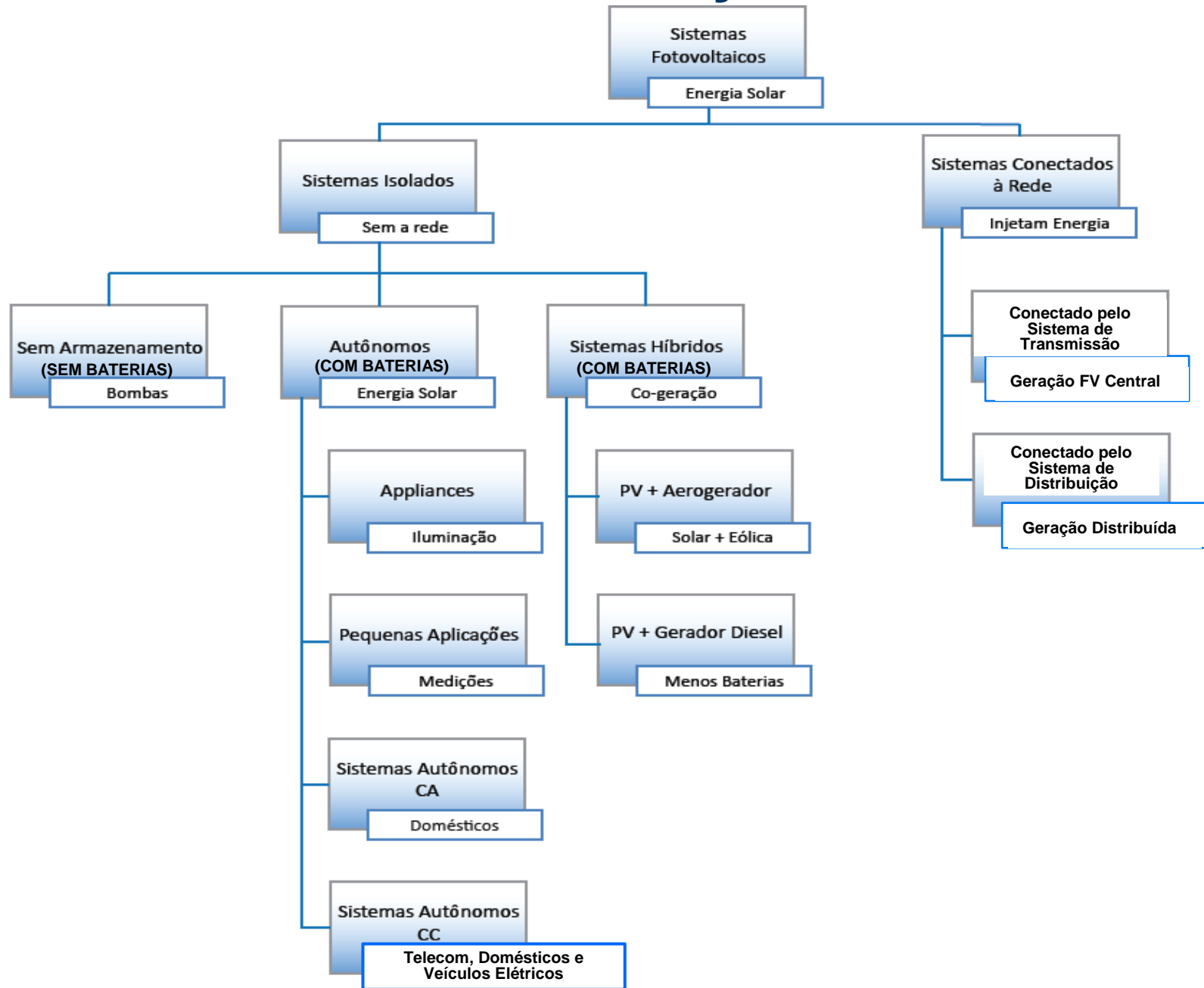


ENERGIA SOLAR PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE

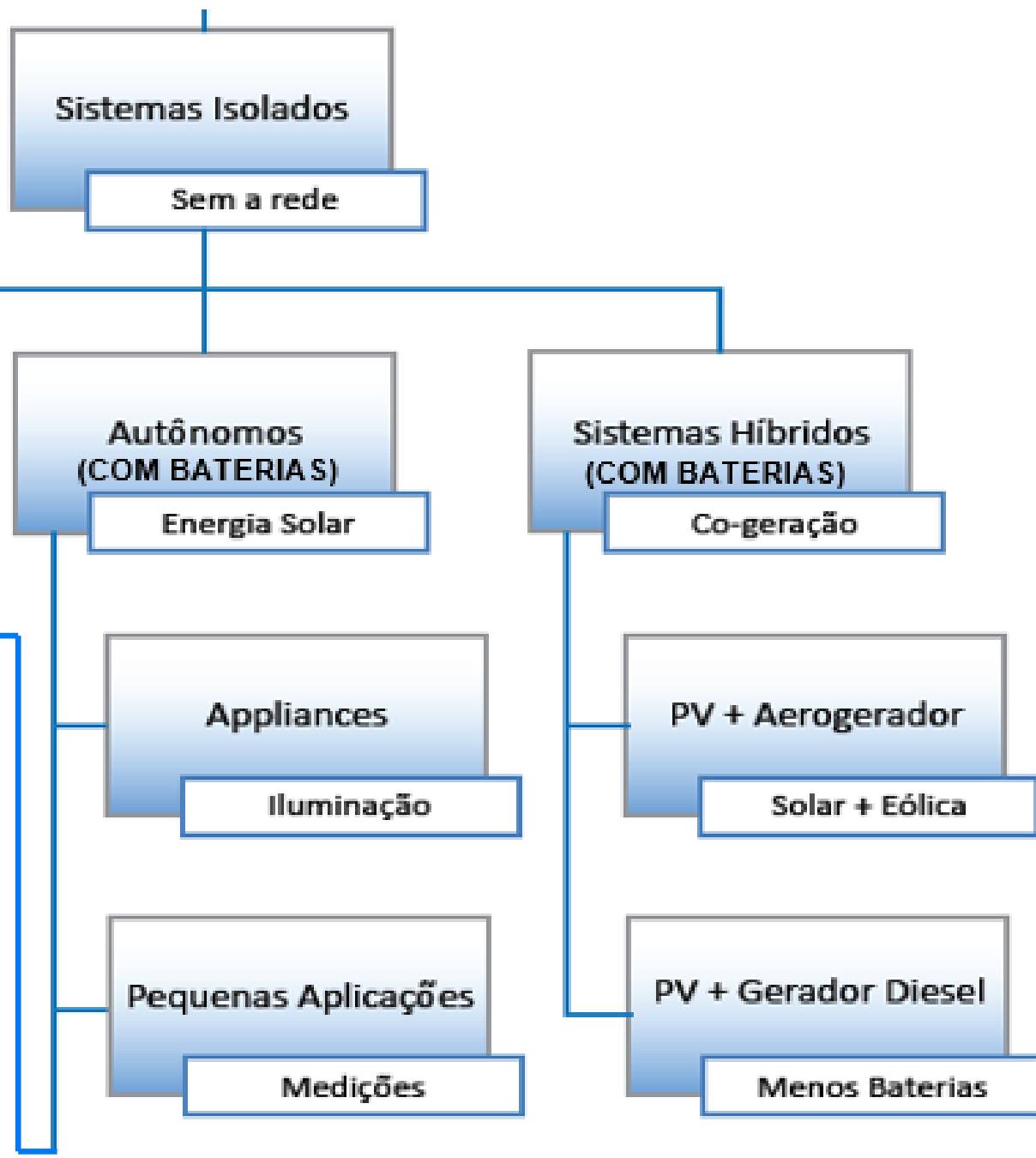
- Produção de Eletricidade com Concentradores Solares (*Concentrating Solar Power, CSP*) → Altas temperaturas de 100 °C até 600 °C → **GERAÇÃO HELIOTÉRMICA**



ENERGIA SOLAR PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE

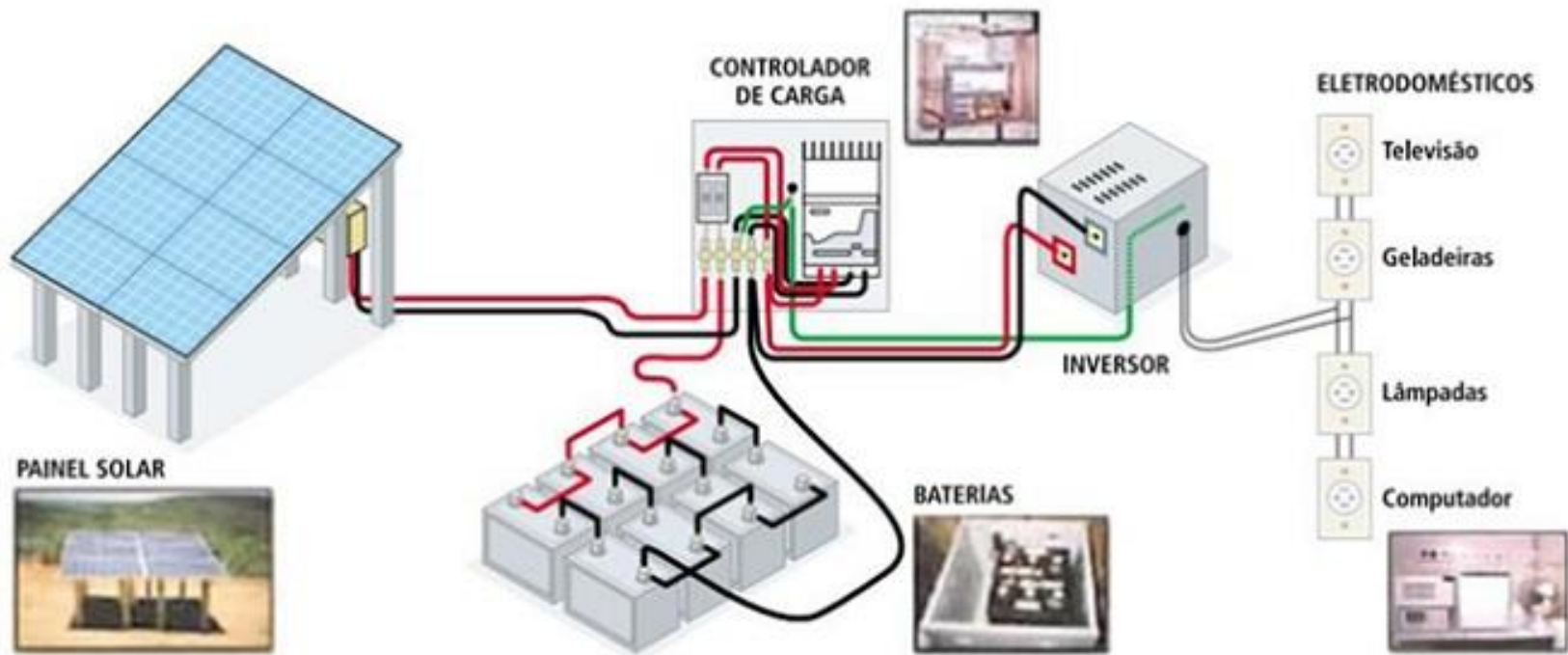


ENERGIA SOLAR PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE



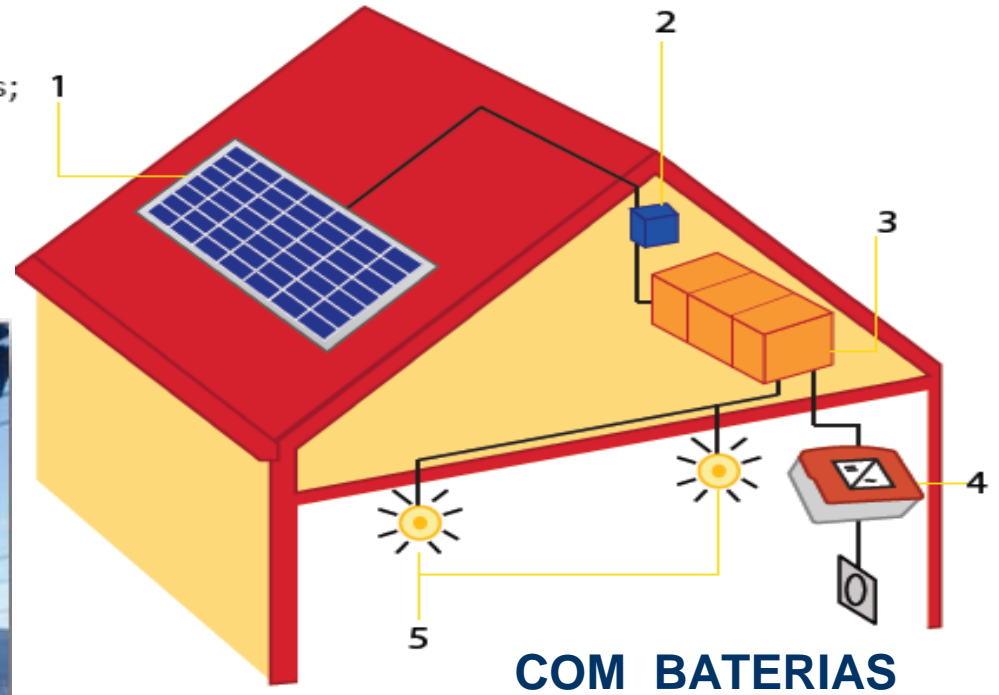
ENERGIA SOLAR PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE

- **Sistemas isolados ou autônomos** para geração de energia solar fotovoltaica de forma não conectada à rede elétrica (**off-grid**). São normalmente construídos para atender demandas específicas em locais onde esta solução é a mais econômica e confiável para obter energia.



SISTEMAS AUTÔNOMOS

- 1 – Painel fotovoltaico;
- 2 – Controlador de Carga/Descarga das baterias;
- 3 – Banco de baterias;
- 4 – Inversor autônomo, para cargas em CA;
- 5 – Cargas CC ou CA;



HÍBRIDO



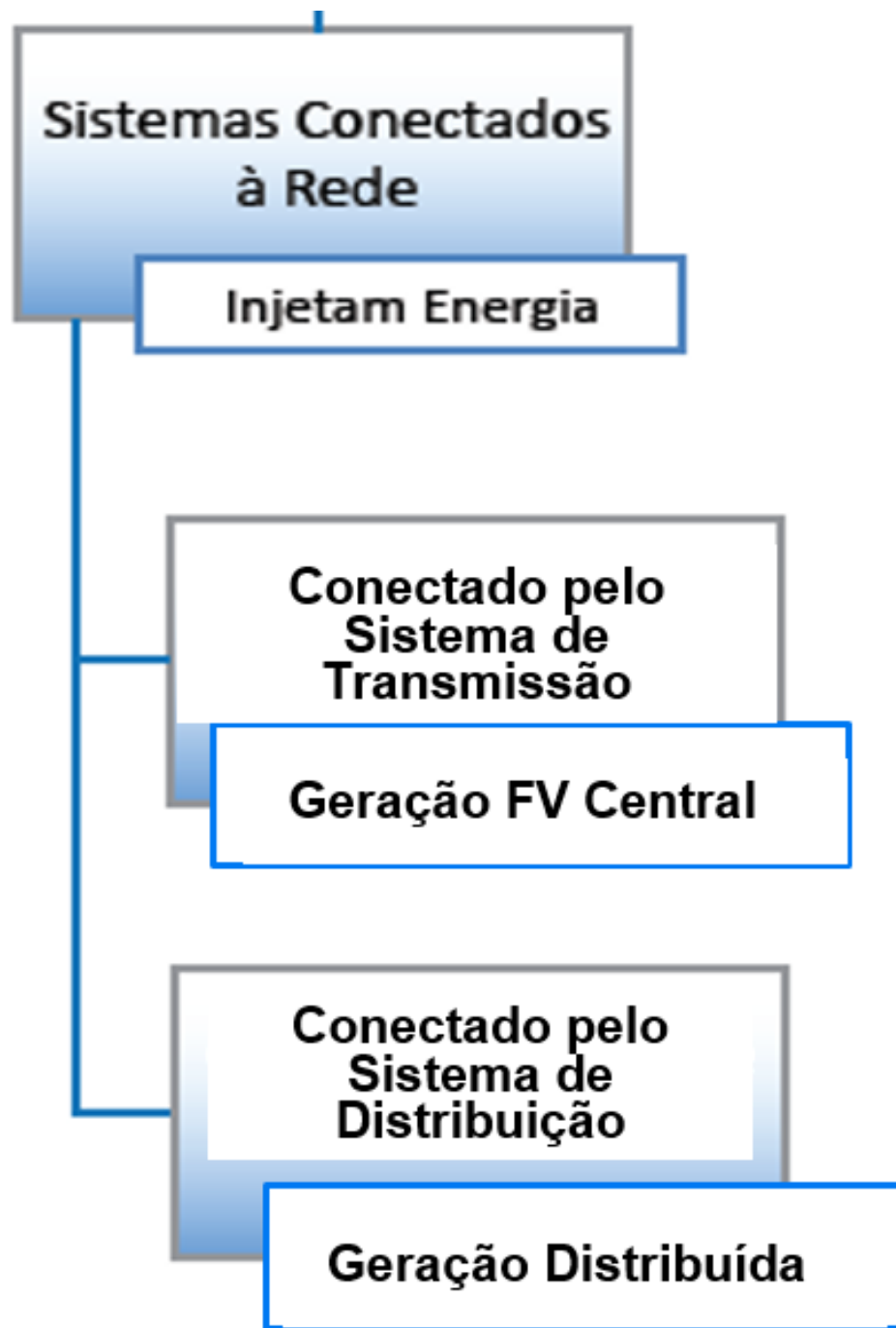
SEM BATERIAS

ENERGIA SOLAR PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE

Sistemas isolados ou autônomos



ENERGIA SOLAR PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE



ENERGIA SOLAR PARA PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE

- **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA** → CONVERSÃO DIRETA DE ENERGIA SOLAR EM ELETRICIDADE

SISTEMA INTERLIGADO À REDE (ON GRID ou GRID-TIE)

GERAÇÃO FOTOVOLTAICA



**MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA OU
MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA
(SMALL SCALE)**

**GERAÇÃO CENTRALIZADA
(UTILITY SCALE)**



Geração Distribuída (GD) – Micro e Mini GDs

- **Geração Distribuída** é o termo dado à energia elétrica gerada **no local ou próximo ao local do consumo, conectada por meio da rede de distribuição** de energia ou por meio da **rede complementar** (com **tensões iguais ou inferiores a 138 kV**) e cuja **geração não é controlada (despachada) pelo ONS**
- **Microgeração distribuída (Micro-GD)** é a Geração distribuída com **potência instalada com valor igual ou inferior a 75 kW** de potência autorizada
- **Minigeração distribuída (Mini-GD)** é a Geração distribuída com **potência instalada com valor superior a 75 kW e igual ou inferior a 3.000 kW (3 MW)** de potência autorizada

Panorama e perspectivas

Alemanha – 1 milhão de telhados fotovoltaicos
(One million solar roofs) - SFCR

Lançado em 1990 e atingido em 2011 – 17,2 GWp



Panorama e perspectivas

Brasil – Megawatt Solar – Eletrosul – América do Sol
Florianópolis / SC – 1 MWp – 2014 – SFCR



Panorama e perspectivas

Brasil – UFG – 2024

CAC, IESA e IME



Panorama e perspectivas

Brasil – UFG – 2024



FEFD solo



Panorama e perspectivas

Brasil – UFG – 2024

Período de análise

01/01/2022  31/12/2023 

Tarifa Grupo A (07/2023) = 0,412150

Tarifa Grupo A (01/2024) = 0,460135

...

Energia gerada total (kWh) = 6.473.270,92

Energia gerada total (R\$) = 2.667.958,61

Energia gerada total (R\$) = 2.978.578,51

As usinas começaram a entrar em operação em 08 de fevereiro de 2022, havendo uma expansão gradativa no número de usinas.



Economia UFG

Mês	2022	2023	Total
1		390.158,82	390.158,82
2	90.869,36	377.840,76	468.710,13
3	162.314,72	340.218,51	502.533,22
4	152.397,82	380.710,61	533.108,43
5	138.969,12	372.149,60	511.118,72
6	118.764,34	359.783,80	478.548,14
7	140.467,42	354.842,86	495.310,28
8	153.395,02	306.766,60	460.161,61
9	237.440,68	309.961,09	547.401,76
10	322.924,07	339.951,23	662.875,30
11	381.143,84	340.282,40	721.426,24
12	354.878,65	347.039,63	701.918,28
Total	2.253.565,02	4.219.705,90	6.473.270,92

Fonte: Absolar – Infográficos – abril/2024

<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>

Dados: abril de 2024

Panorama e perspectivas

Benefícios da Fonte Solar Fotovoltaica ao Brasil

Fonte: ABSOLAR, 2024.



Mais de **41,1 GW** operacionais.



Mais de **R\$ 195,6 bilhões** em novos investimentos.



Mais de **1,2 milhão de novos empregos** gerados.



Mais de **R\$ 61,3 bilhões** em arrecadação de tributos.

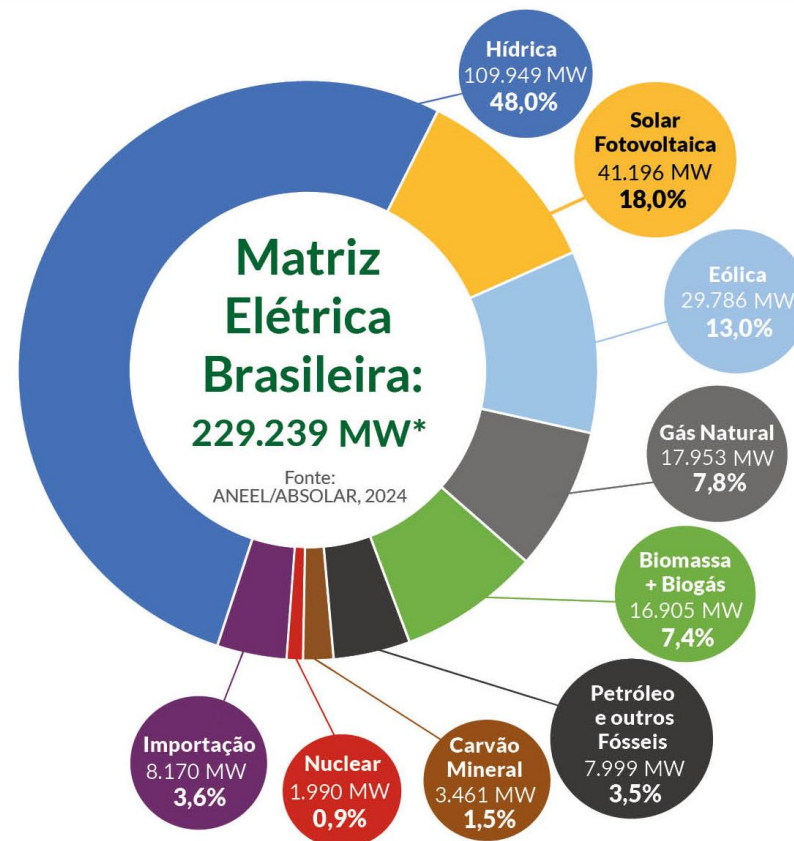
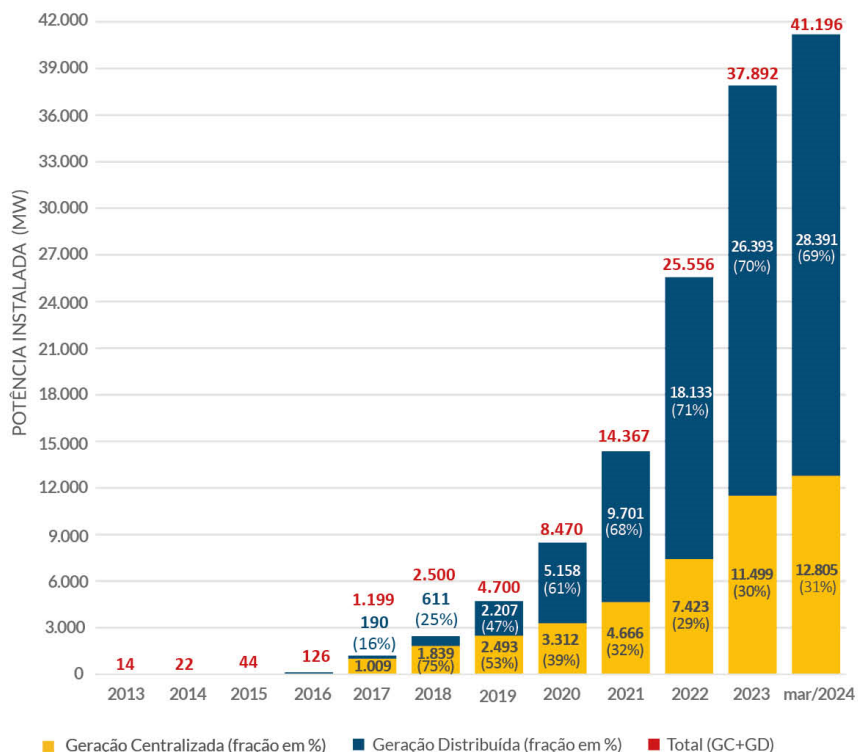


Mais de **47,6 milhões de toneladas de CO₂** evitadas.

Dados acumulados desde 2012.

Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2024.

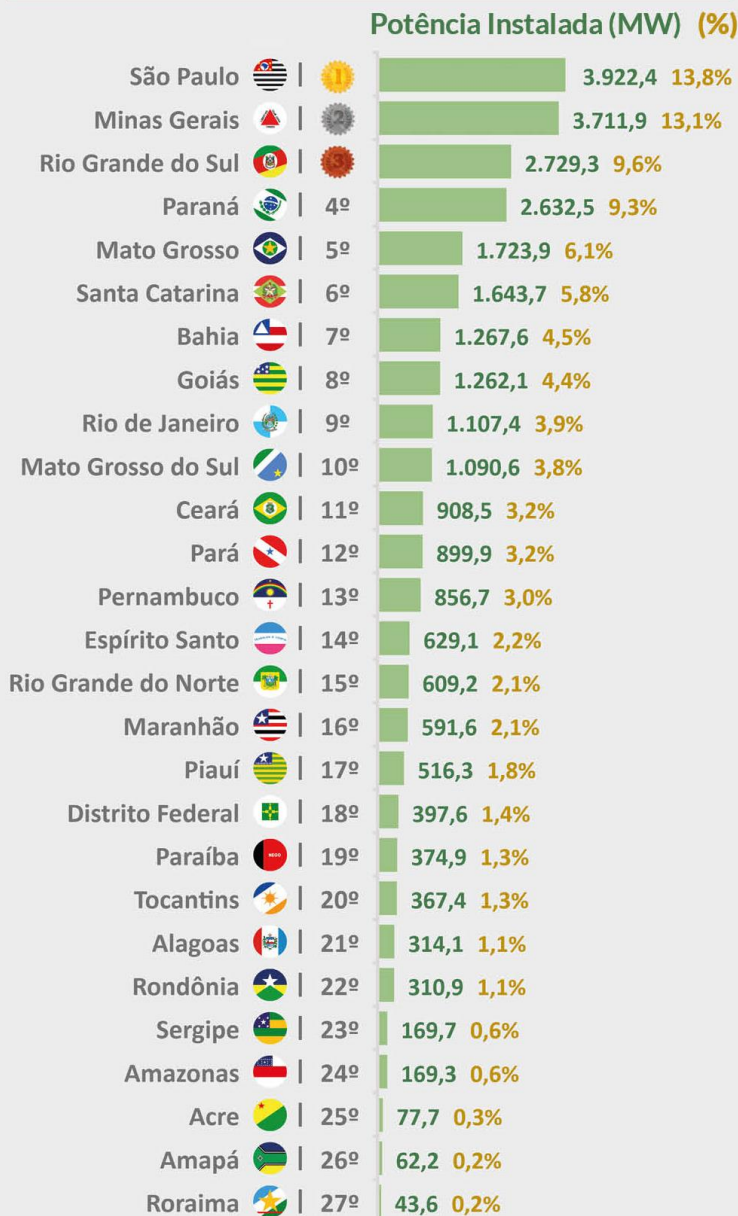


*A potência total da matriz não inclui a importação e segue critério aplicado pelo MME, que adiciona, nos valores de capacidade instalada, as quantidades de mini e microgeração distribuída associadas a cada tipo de fonte.

Geração Distribuída

Ranking Estadual

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2024.



Panorama e perspectivas

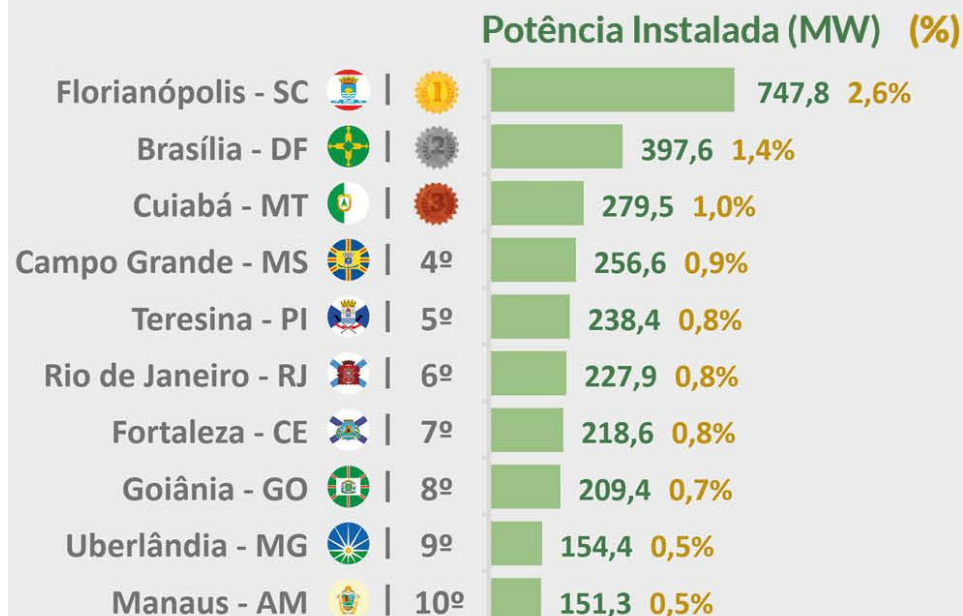
Fonte: Absolar – Infográficos – abril/2024

<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>

Dados: abril de 2024

Ranking Municipal

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2024.



Fonte: Absolar – Infográficos – abril/2024

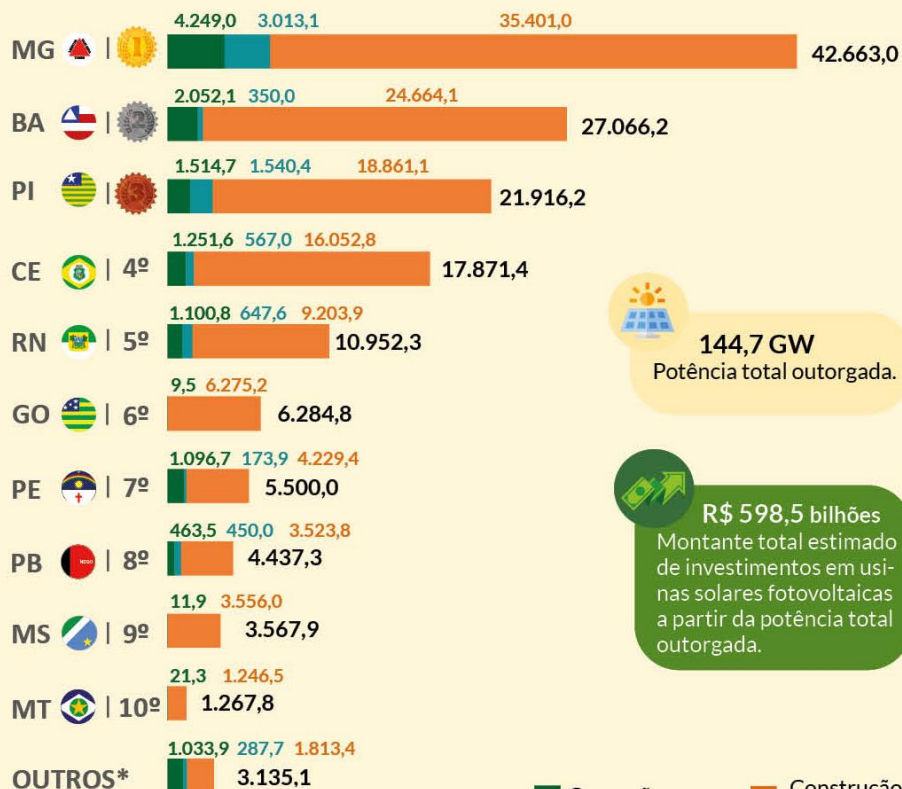
<http://www.absolar.org.br/infografico-absolar.html>

Dados: abril de 2024

Geração Centralizada

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2024.

Potência instalada (MW) e status das usinas solares fotovoltaicas outorgadas do mercado regulado e do mercado livre por estado:



*Usinas espalhadas em 17 estados brasileiros

Panorama e perspectivas

Geração Distribuída

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2024

Sistemas de microgeração (até 75 kW) e minigeração (acima de 75 kW e até 5 MW*) distribuída solar fotovoltaica implantados em residências, comércios, indústrias, propriedades rurais e prédios públicos.



99,07%

é a fração de potência instalada na microgeração e minigeração distribuída da fonte solar fotovoltaica, líder isolada do segmento.



2.529.251

sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede.



99,97%

de todas as conexões de micro e minigeração distribuída são da fonte solar fotovoltaica.



3.629.670

unidades consumidoras (3,93% do total)

recebendo créditos pelo Sistema de Compensação de Energia Elétrica.

*Após 7 de fevereiro de 2023, são definidas como minigeração distribuída, todas as unidades com potência instalada acima de 75 kW e menor ou igual a: 5 MW para centrais geradoras de fontes despacháveis 3 MW para as demais fontes não enquadradas como centrais geradoras de fontes despacháveis

Cadeia Produtiva

Fonte: BNDES, 2024.

Quantidade de fabricantes do setor solar fotovoltaico cadastrados no FINAME do BNDES:



147



Sistema Solar Fotovoltaico (Kit)



8

Inversor Fotovoltaico



12

Rastreador Solar



8

Módulo Fotovoltaico



5

Bateria



3

String Box

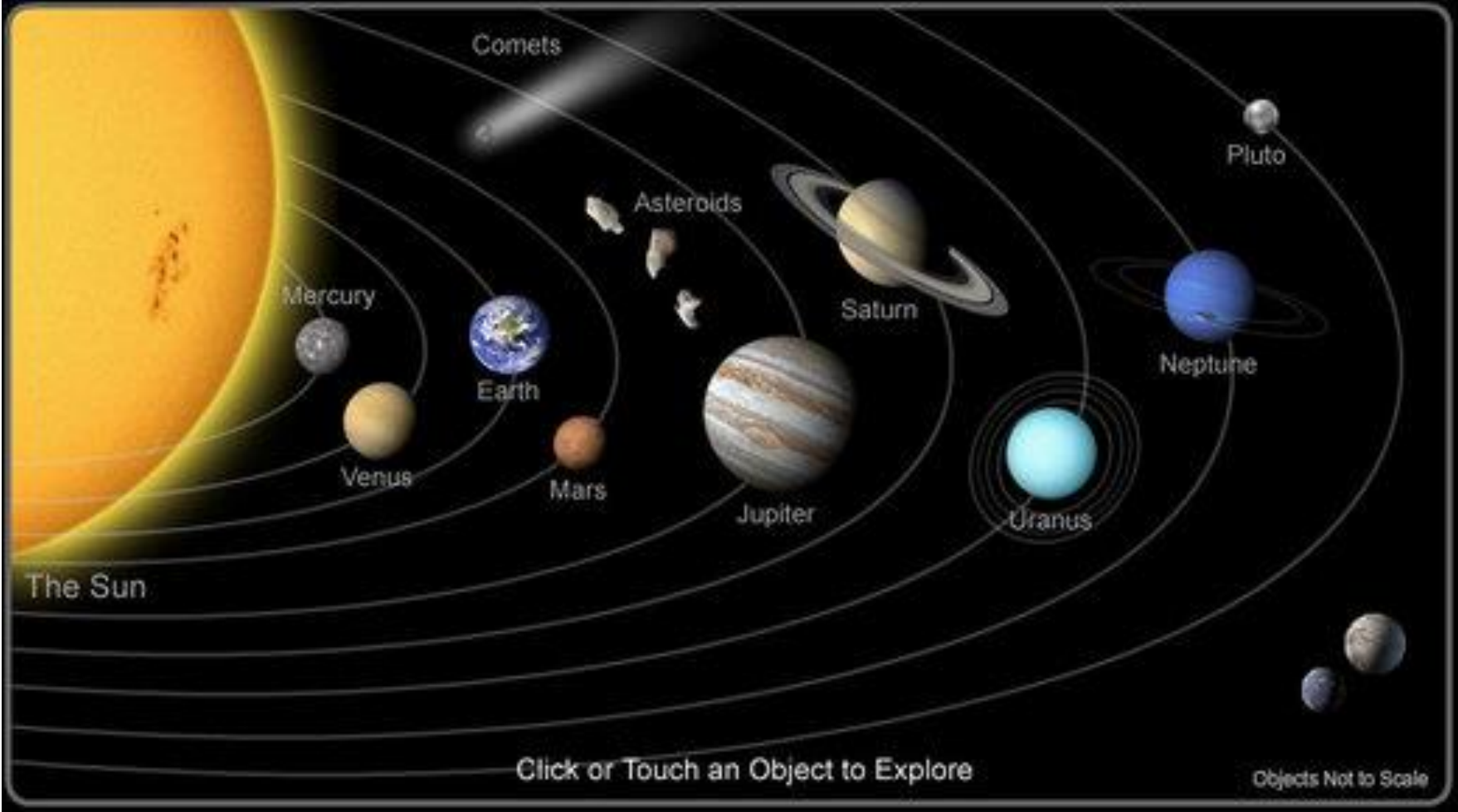
O Brasil necessita de uma política industrial competitiva e justa para o setor, reduzindo os preços de componentes e equipamentos produzidos no País, gerando mais empregos, tecnologia e inovação.

PARTE 2

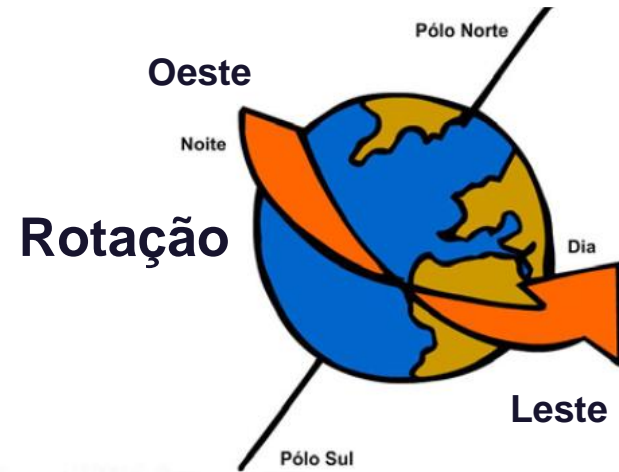
**Geometria Sol-Terra. Conceitos Físicos.
Recurso Solar**

Geometria Sol – Terra

Nosso Sistema Solar



Geometria Sol – Terra



Equinócio de 21 de Março
Início da Primavera no hemisfério
Norte e início do Outono no
hemisfério Sul



Solstício de 21 ou 22 de Dezembro
Início do Inverno no hemisfério
Norte e início do Verão no
hemisfério Sul



Translação



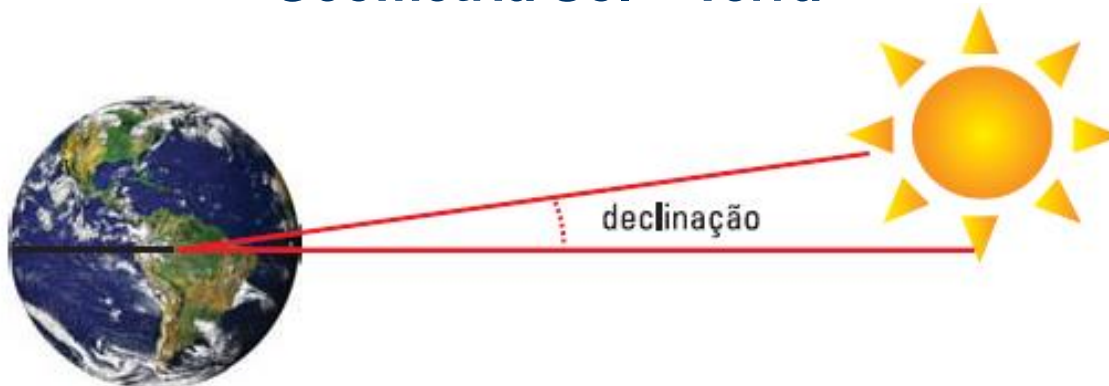
Solstício de 21 de
Junho
Início do Verão no hemisfério
Norte e início do Inverno no
hemisfério Sul

Equinócio de 22 ou 23 de Setembro
Início do Outono no hemisfério
Norte e início da Primavera no
hemisfério Sul

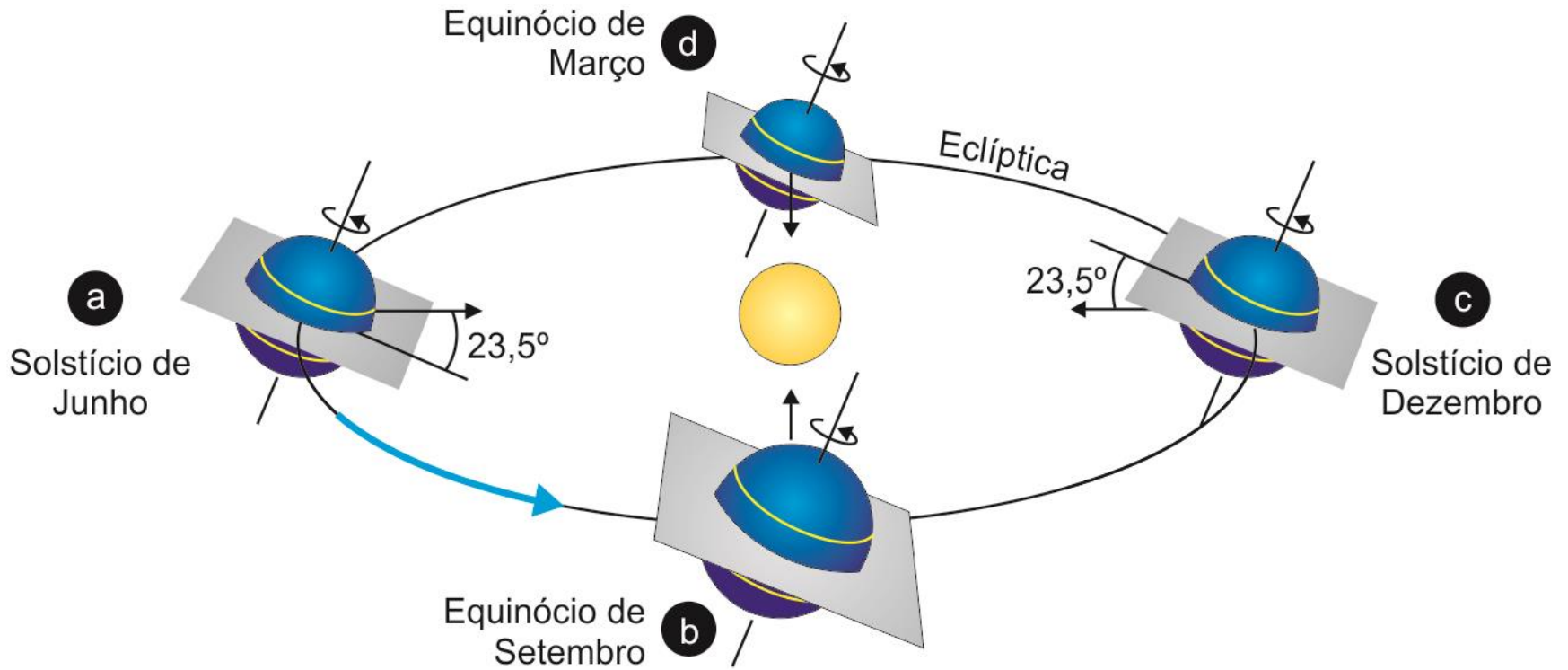


Órbita da Terra: caminho percorrido pela
Terra no seu movimento em torno do Sol

Geometria Sol – Terra



Geometria Sol – Terra



a
Trópico de Câncer
voltado para o Sol

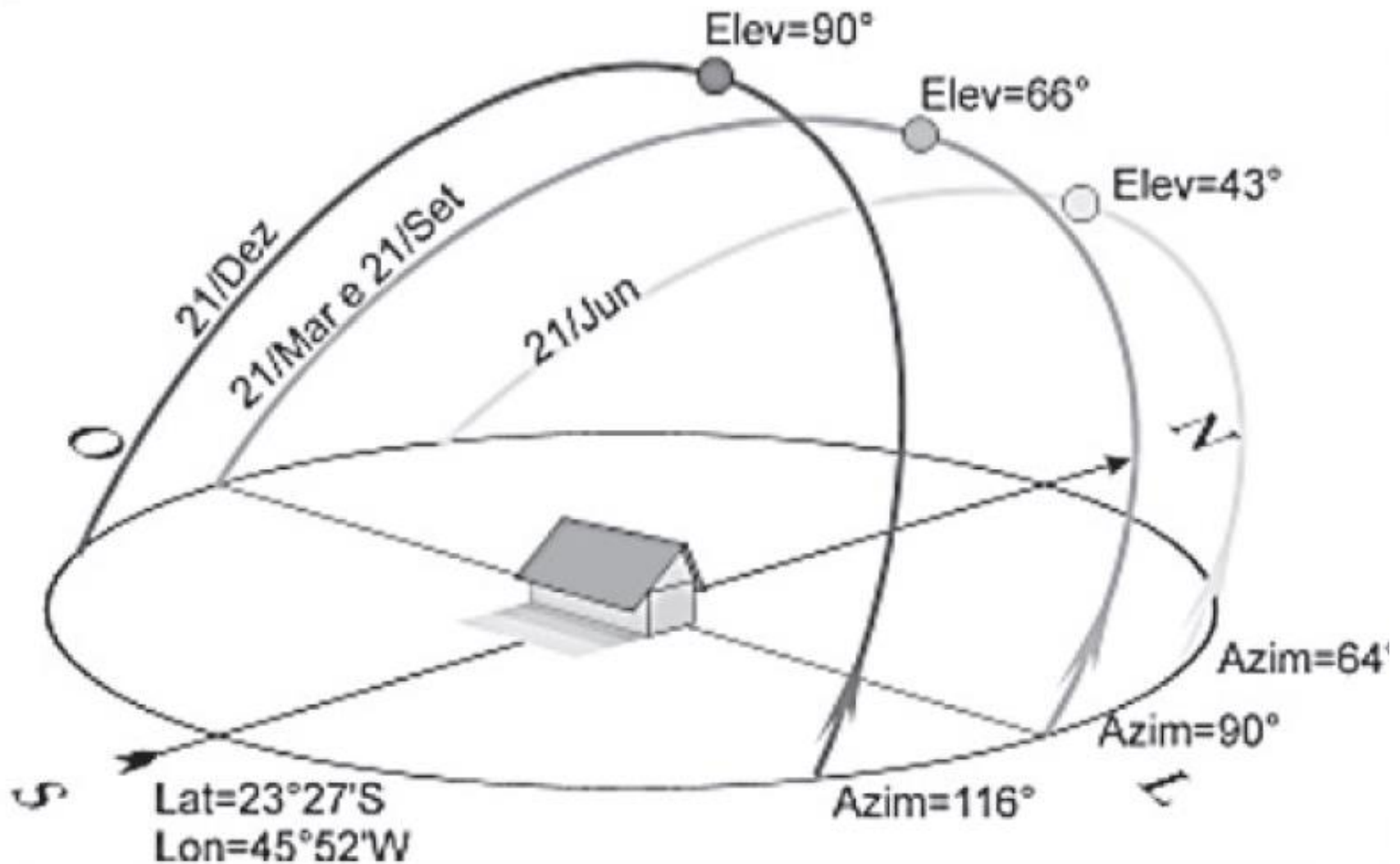
b
Equador voltado
para o Sol.

c
Trópico de Capricórnio
voltado para o Sol.

d
Equador voltado
para o Sol.

Geometria Sol – Terra – ABNT

Percurso do Sol ao longo do dia e em um ano para observador no Hemisfério Sul no Trópico de Capricórnio

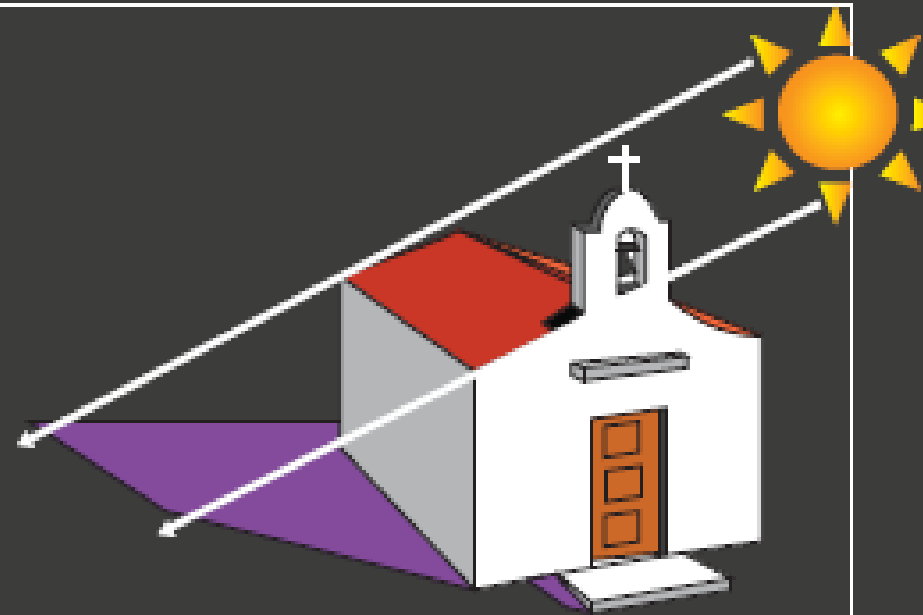


Geometria Sol – Terra

Mesmo Horário



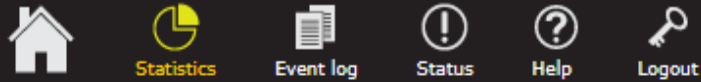
Verão



Inverno

Recurso Solar – Exemplo de Produção no SFV da EMC/UFG – Bloco B

Dia Claro

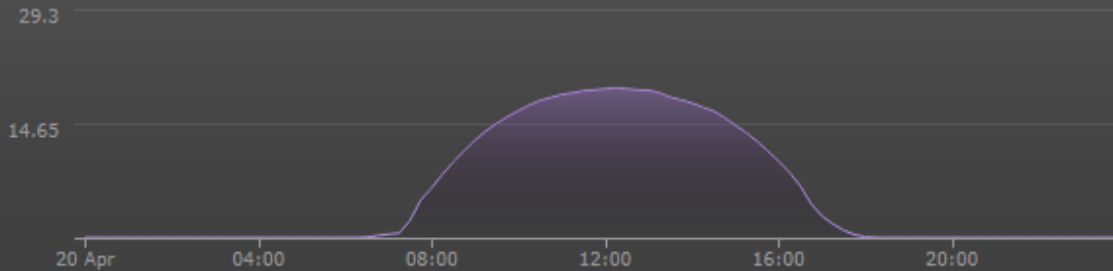


THEIA™ Analyzer

Last 7 days

Plant

Wednesday Thursday Friday Saturday Sunday Monday Tuesday



Energy Production

136.1 kWh

Earnings

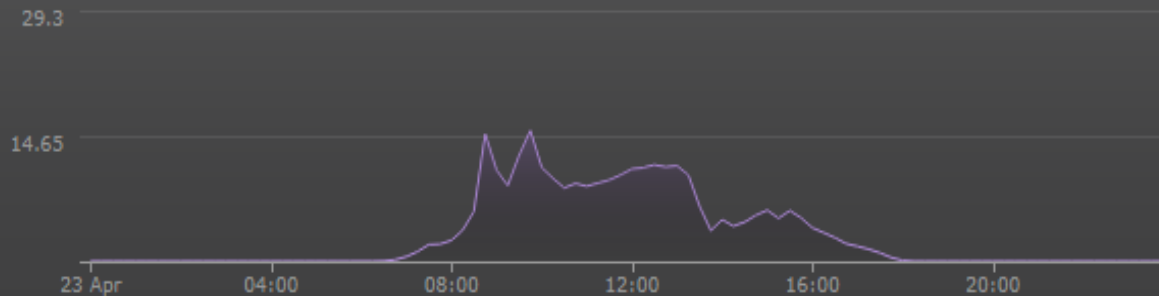
136.08x

Avoided CO2

95kg

Dia Nublado

Wednesday Thursday Friday Saturday Sunday Monday Tuesday



Energy Production

72.0 kWh

Earnings

71.97x

Avoided CO2

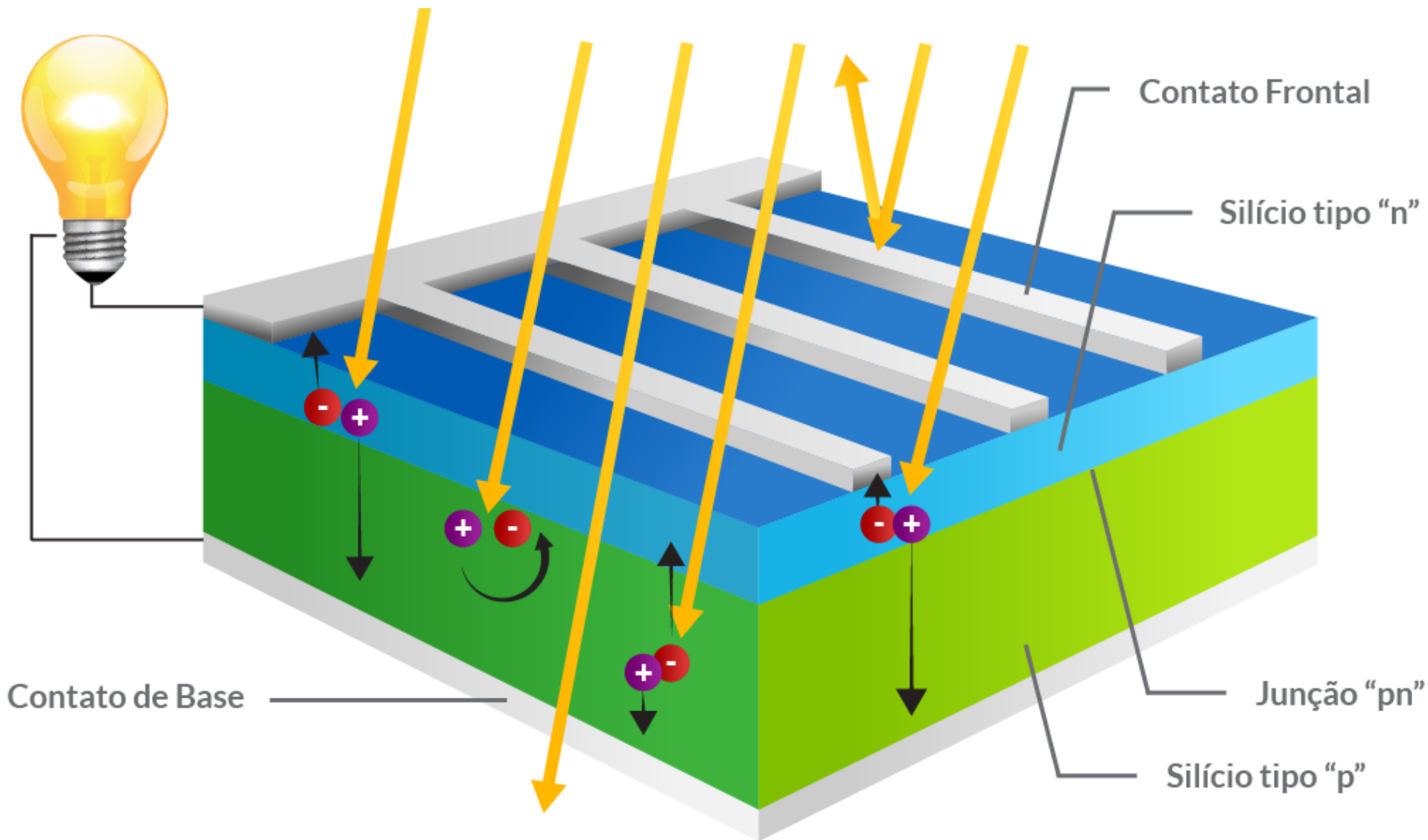
50kg

A SEGUIR

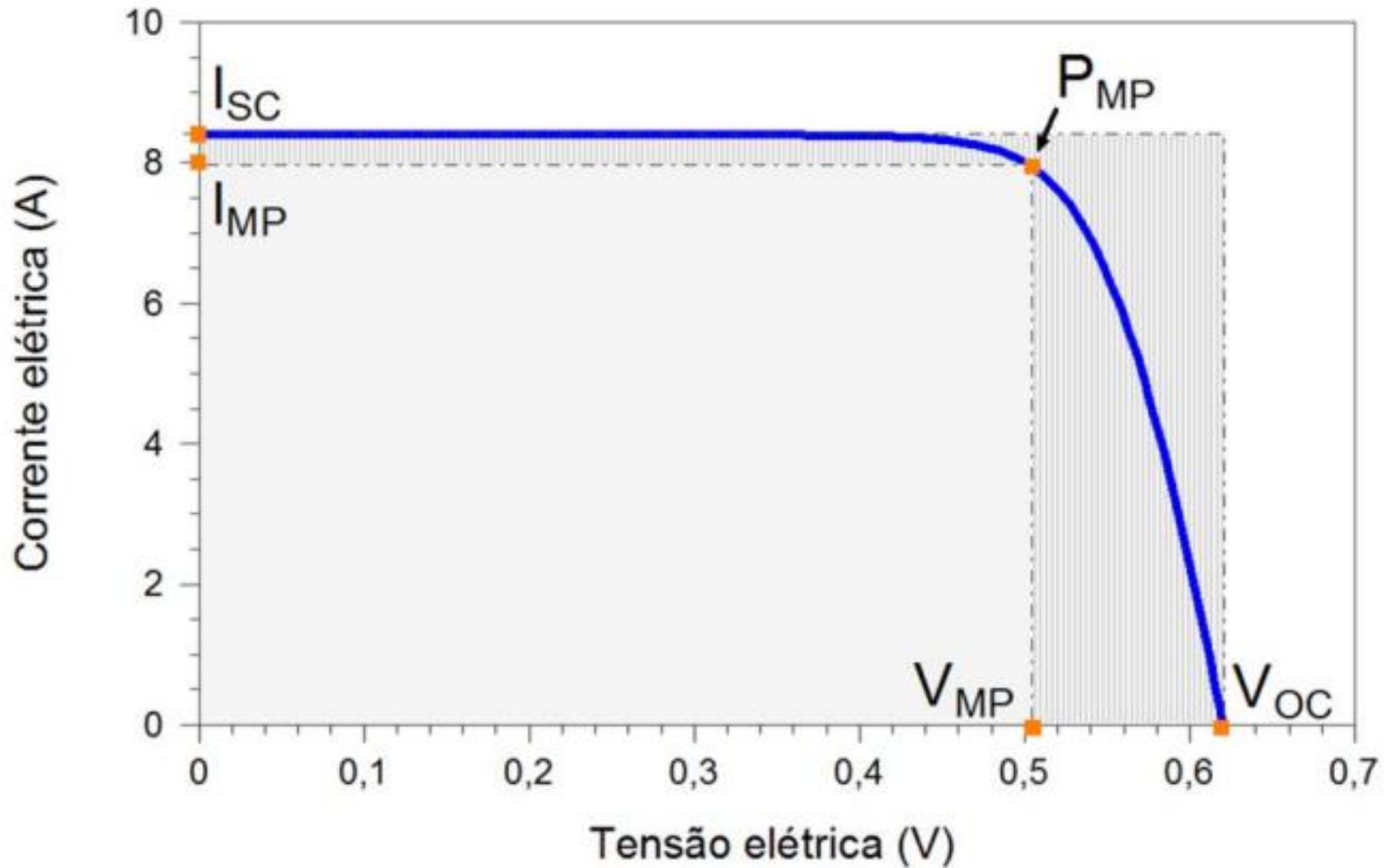
PARTE 3

**Efeito fotovoltaico. Associação de módulos.
Seguimento do Ponto de Potência Máxima
(SPPM). Células e módulos fotovoltaicos.**

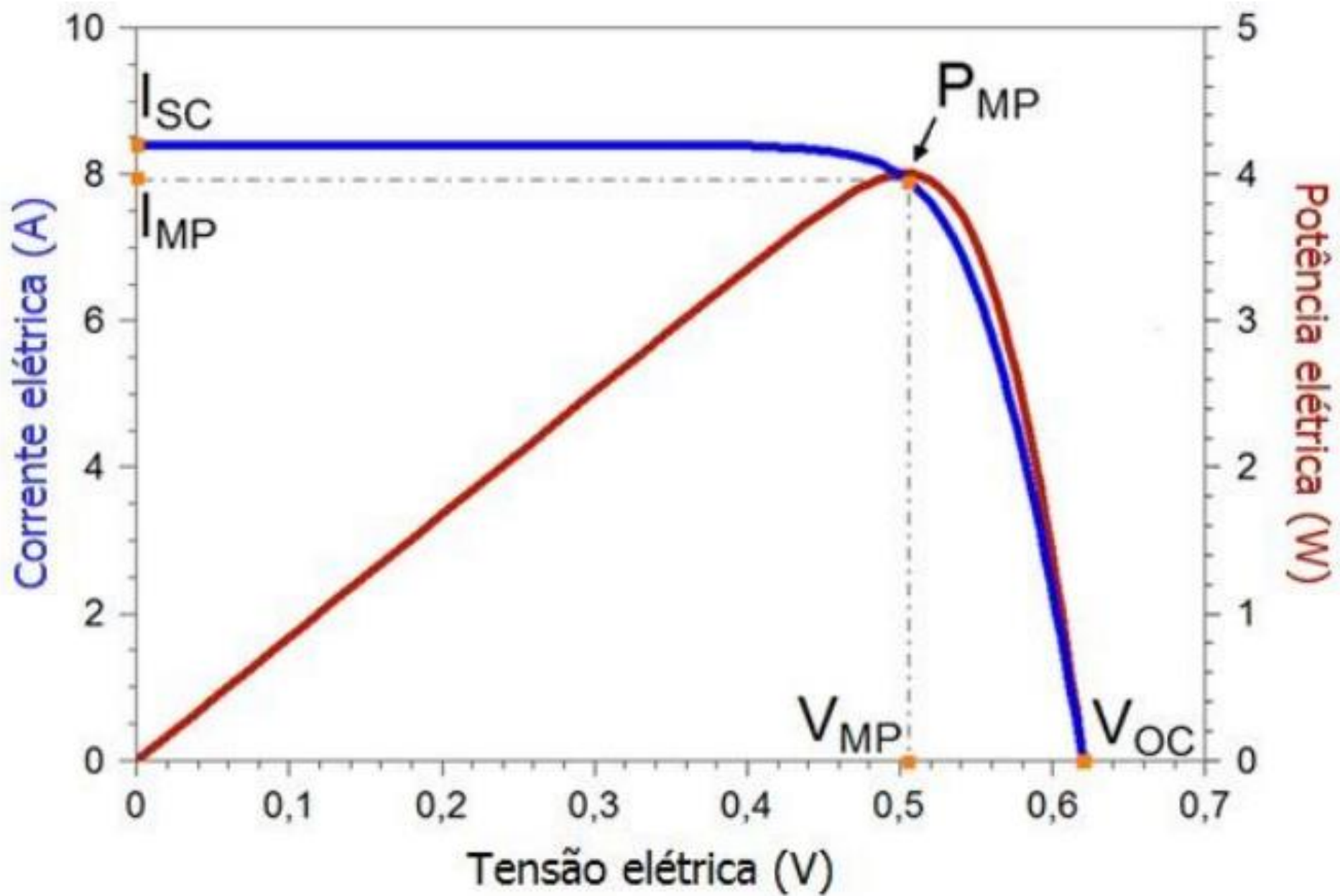
Efeito fotovoltaico



Células e módulos fotovoltaicos



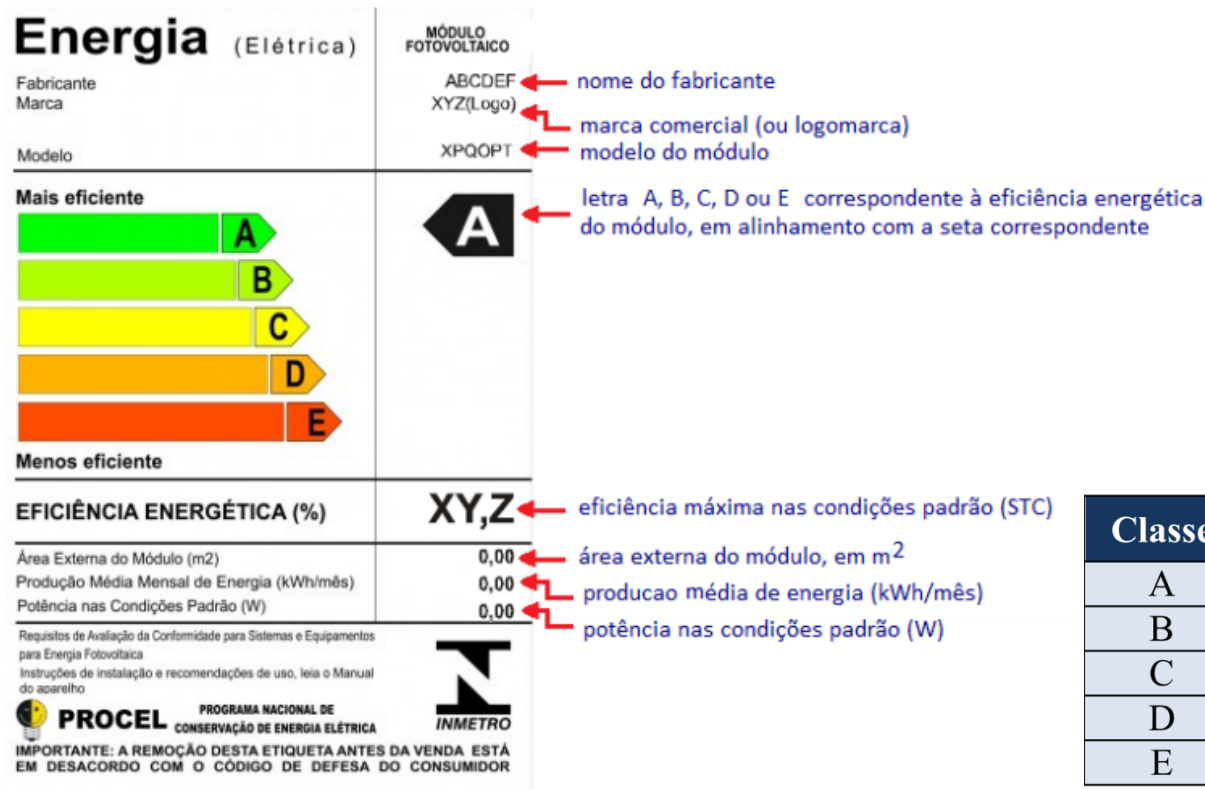
Seguimento do Ponto de Potência Máxima (SPPM)



Células e módulos fotovoltaicos

Registro Inmetro

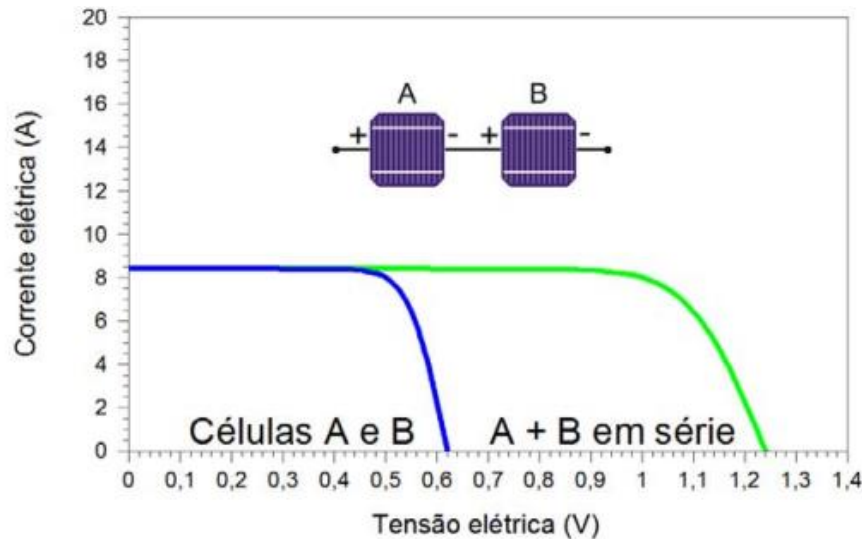
Os módulos comercializados no Brasil devem ser ensaiados de acordo com o RAC do Inmetro (INMETRO, 2011) e apresentar o respectivo registro (pode ser consultado na página do Inmetro na internet – www.inmetro.gov.br) e a etiqueta afixada na sua superfície posterior, como a da Figura 4.5.



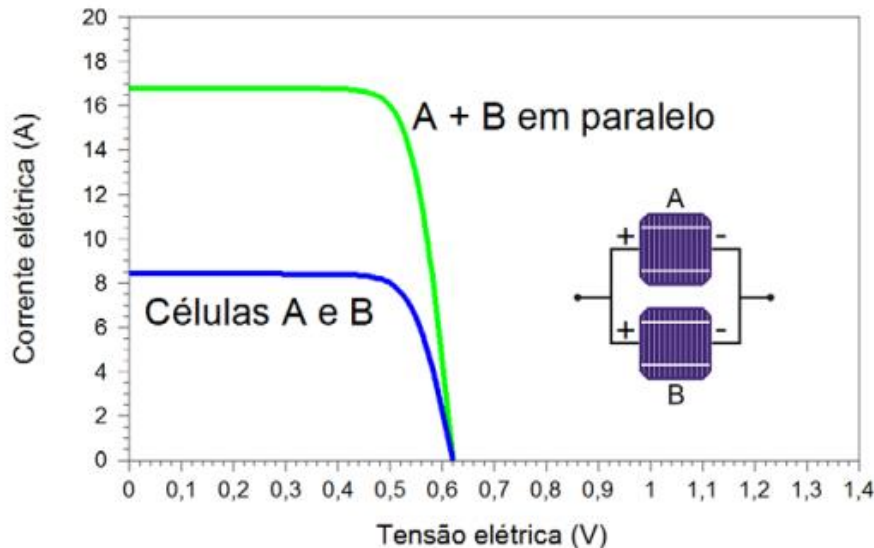
Classe	Faixa
A	Maior que 13,5%
B	Maior que 13% a 13,5%
C	Maior que 12% a 13%
D	Maior que 11% a 12%
E	Menor ou igual a 11%

Modelo de etiqueta do Inmetro afixada nos módulos; os dados indicados pelas setas são informados para cada modelo de módulo, depois dos ensaios realizados por laboratório credenciado. Adaptado de (INMETRO, 2011).

Associação de células



(a)



(b)

Associação em Série

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

Série (ou cadeia ou “string” fotovoltaica)

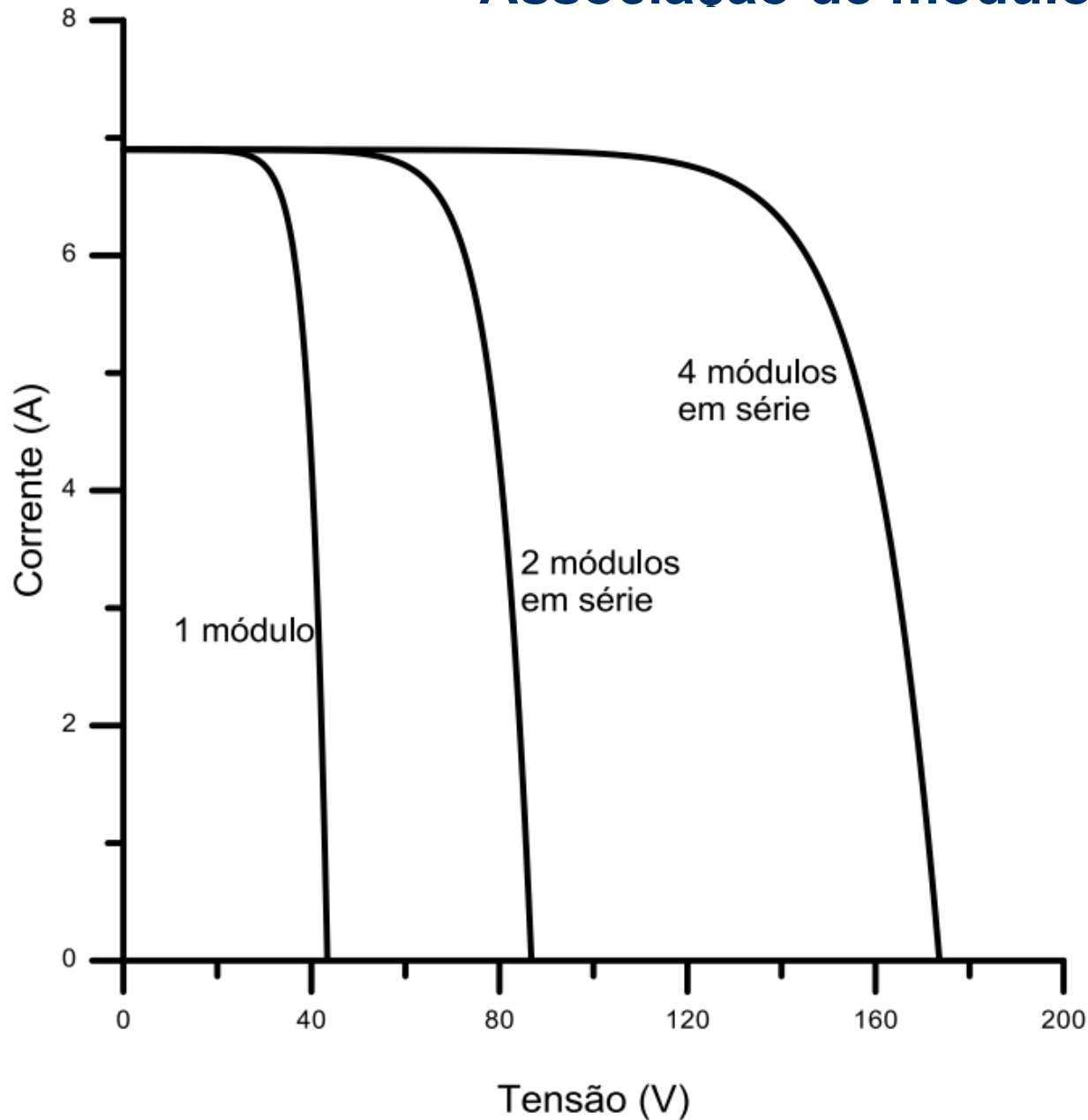
Associação em Paralelo

$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

Arranjo em Paralelo de séries (“strings”) ou de células ou de módulos

Associação de módulos



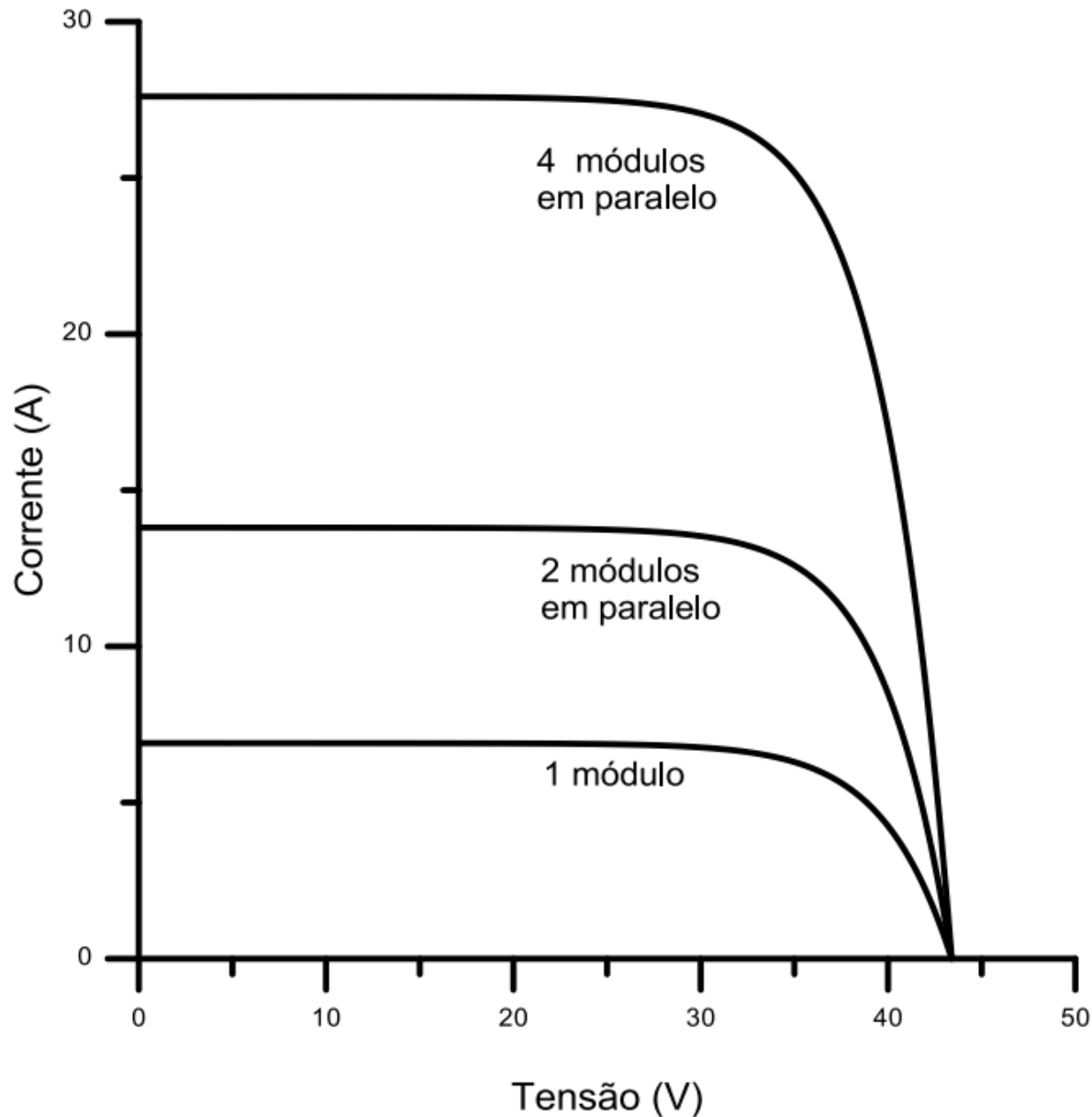
Associação em Série

$$I = I_1 = I_2 = \dots = I_n$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

Série (ou cadeia ou “string” fotovoltaica)

Associação de módulos



Associação em Paralelo

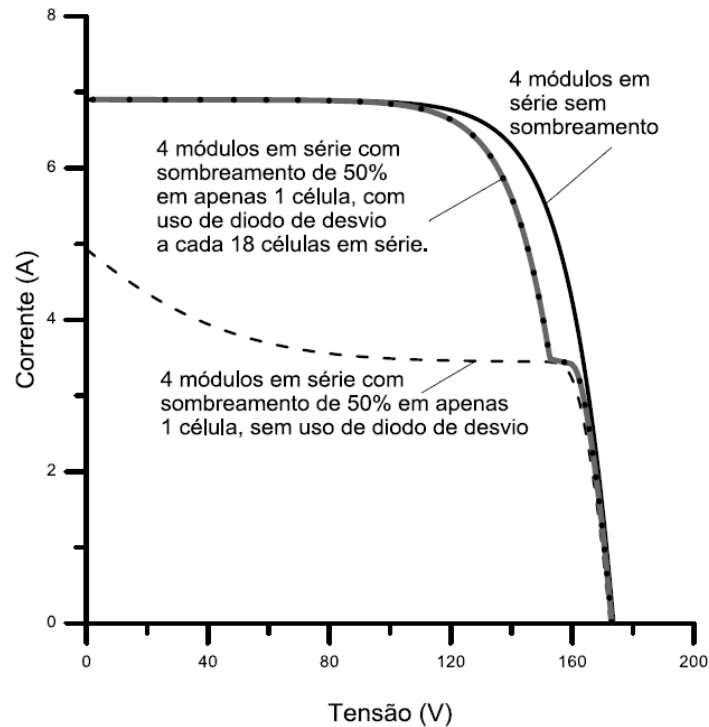
$$V = V_1 = V_2 = \dots = V_n$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n$$

Arranjo em Paralelo de séries ("strings") ou de módulos

Associação de módulos

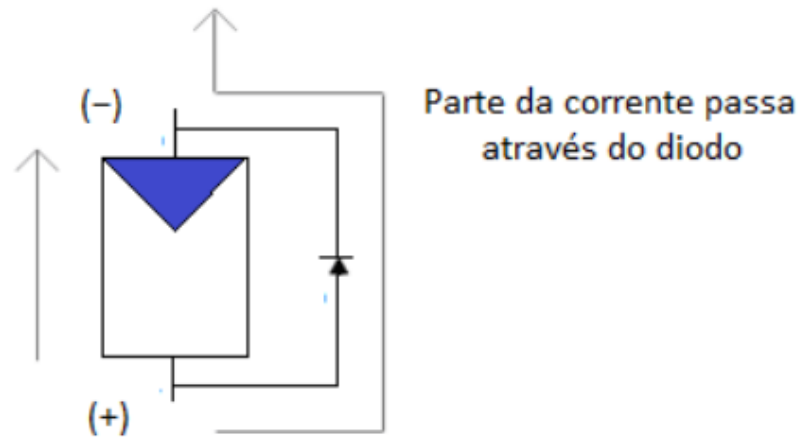
Efeitos do Sombreamento



Curva $I-V$ para 4 módulos conectados em série e sem sombreamento (linha contínua); curva $I-V$ para os mesmos 4 módulos na situação de sombreamento de uma de suas células, que passa a receber 50 % da irradiância original (linha tracejada); curva $I-V$ com o mesmo sombreamento, mas com a utilização de diodos de desvio (curvas com linha contínua e pontos).

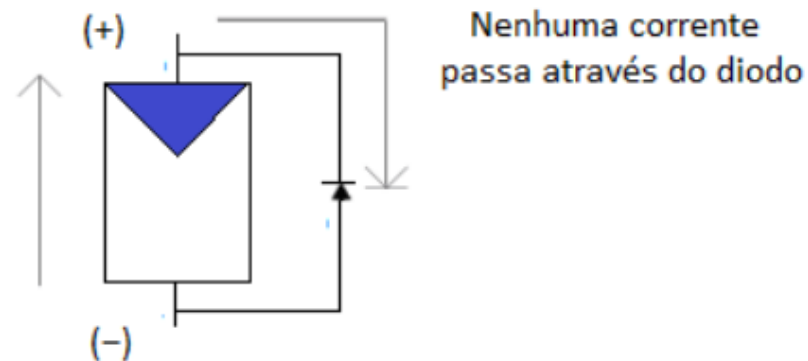
O sombreamento total ou parcial de um módulo (ou célula) afeta toda a fileira de módulos em série, limitando a corrente e a potência aos valores dos módulos sombreados. O sombreamento pode também produzir pontos quentes e danos às células sombreadas (*hotspots*). Os diodos de desvio (*by-pass*) são usados para amenizar os efeitos do sombreamento.

Associação de módulos – Diodos de desvio (*by-pass*)



Elemento muito sombreado ou com defeito

Toda corrente passa através do módulo e para as cargas

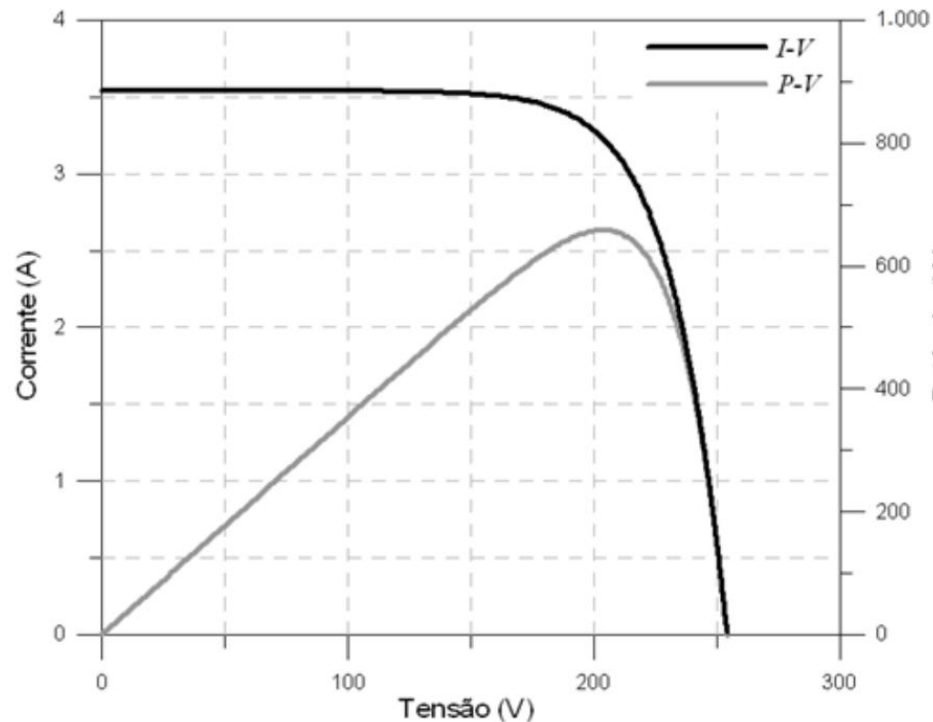


Elemento normal, pouco sombreamento ou com pouco descasamento

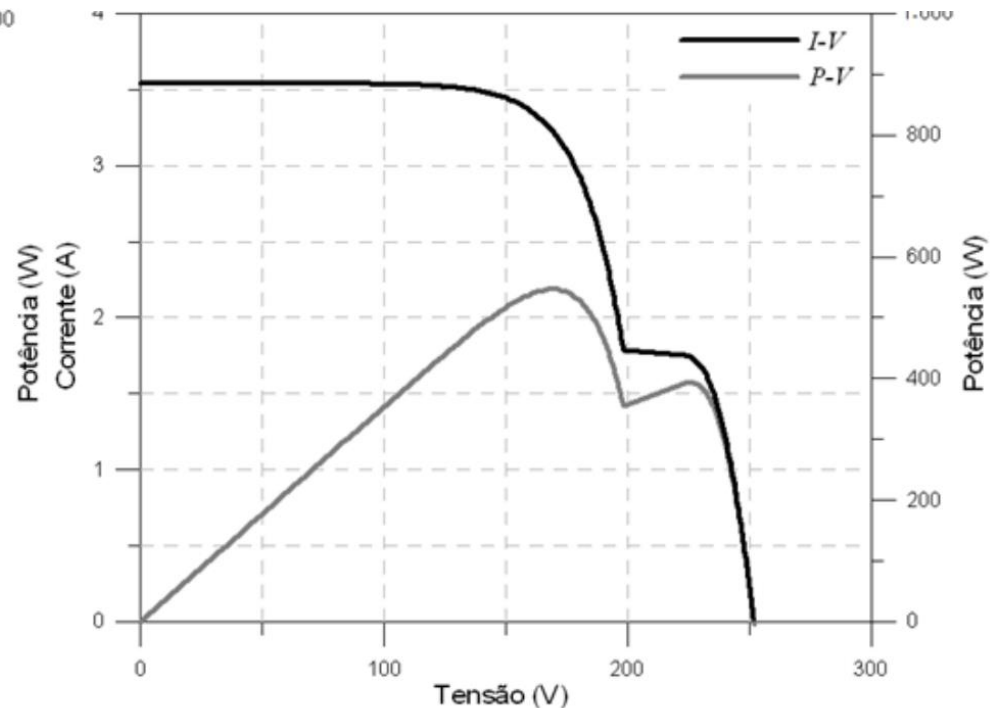
Operação de um diodo de desvio.

Seguimento do Ponto de Potência Máxima (SPPM)

Efeitos do Sombreamento sobre o SPPM



(a)



(b)

Curvas $I-V$ (preta) e $P-V$ (cinza) de um gerador de seis módulos de 72 células em série, mostrando a ocorrência de máximos locais na curva de potência em decorrência de sombreamentos parciais: (a) todos sem sombreamento e (b) com um dos módulos submetido a um fator de sombreamento de 50 %.

Os módulos com a tecnologia de filmes finos normalmente têm melhor desempenho na presença de sombreamento que os de c-Si, sofrendo menores reduções de rendimento

Processos de Fabricação

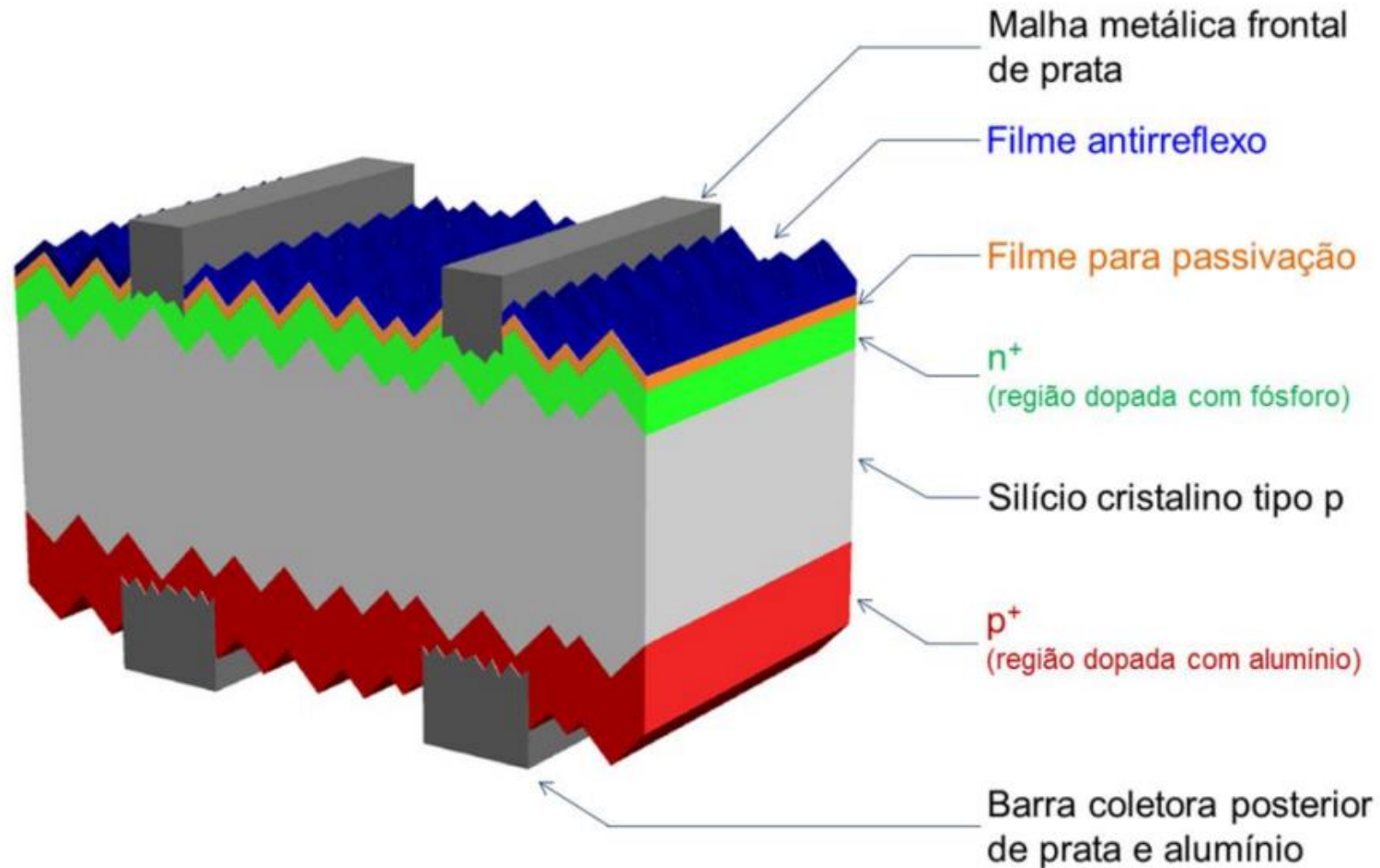


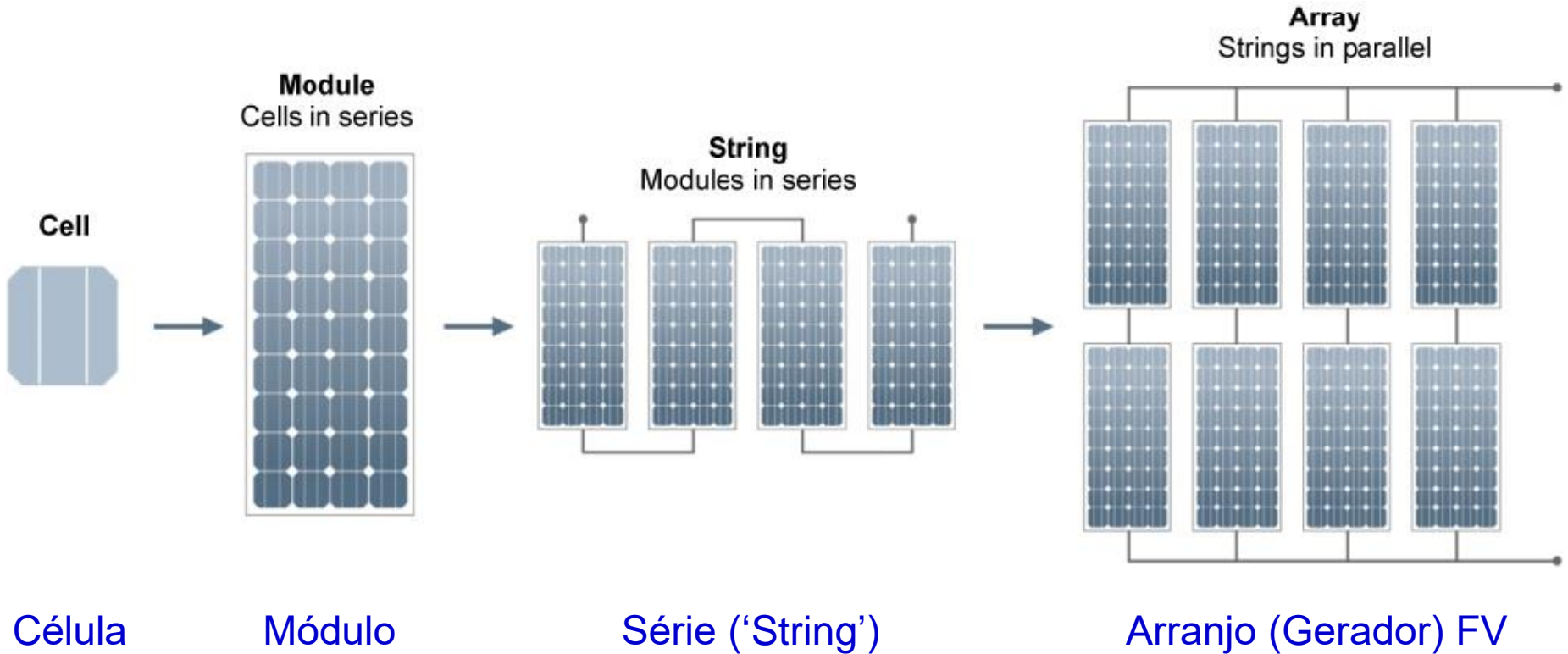
Figura 3.19 - Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício cristalino.

A malha metálica frontal de Ag , a região P^+ dopada com Al e a grade de $Al-Ag$ para formar os contatos posteriores são depositadas por serigrafia e processadas em forno de esteira



Energia Solar Fotovoltaica

Célula fotovoltaica



Exemplos de Arranjos Fotovoltaicos (Geradores Fotovoltaicos)



Exemplos de Arranjos Fotovoltaicos (Geradores Fotovoltaicos)



Células e módulos fotovoltaicos

DIFERENTES TIPOS DE MÓDULOS

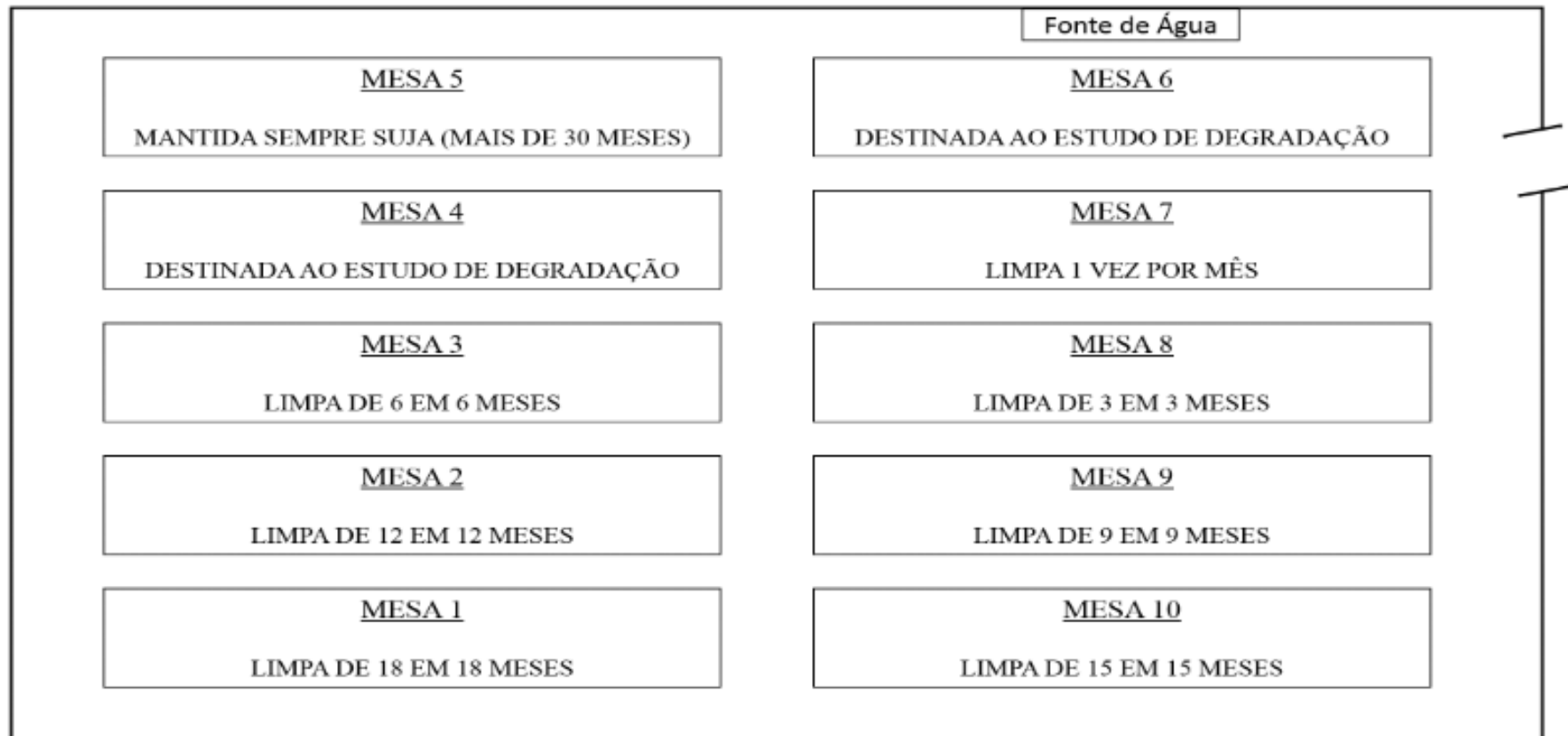


EFEITO DA SUJIDADE EM AMBIENTE URBANO

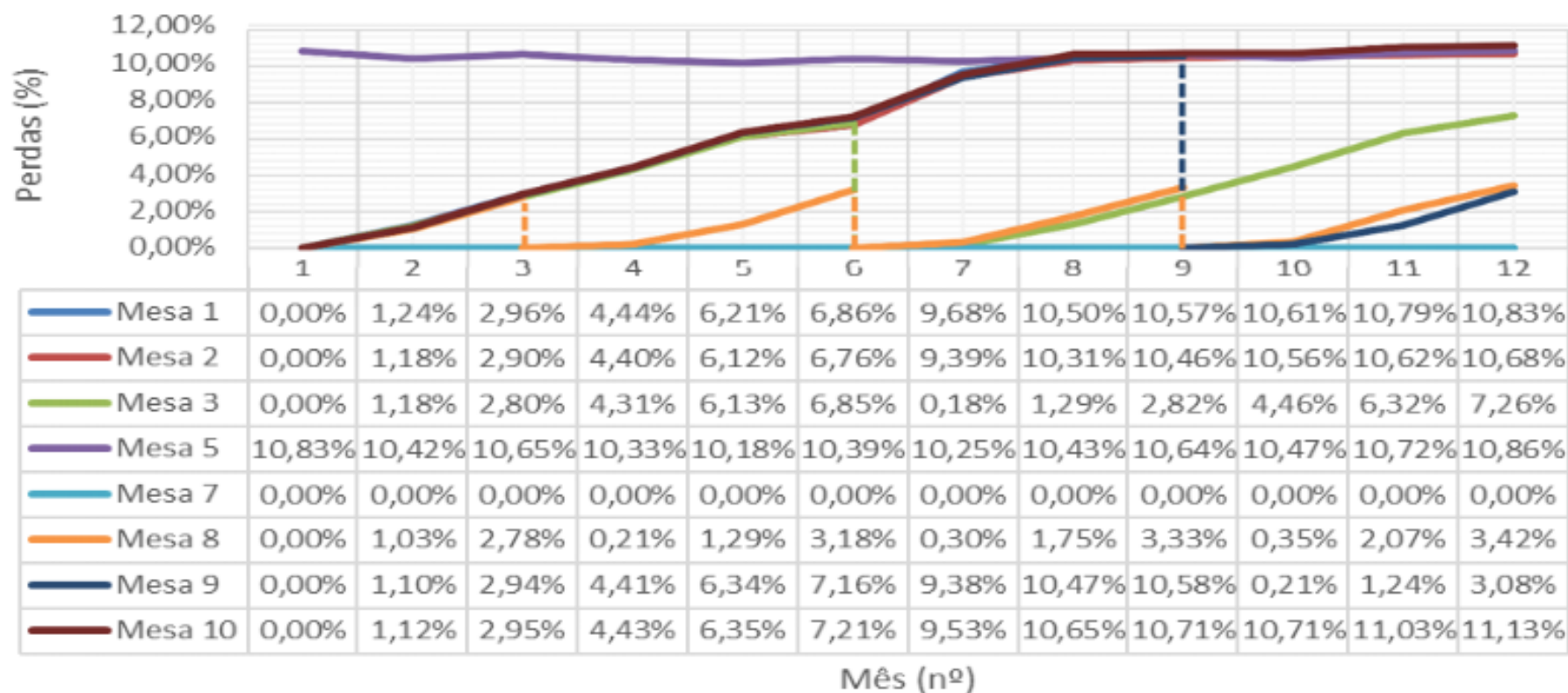


Comparação entre módulos limpos e sujos com mais de 30 meses de sujeidade acumulada.

Esquematização da rotina de limpeza nas mesas fotovoltaicas da central solar

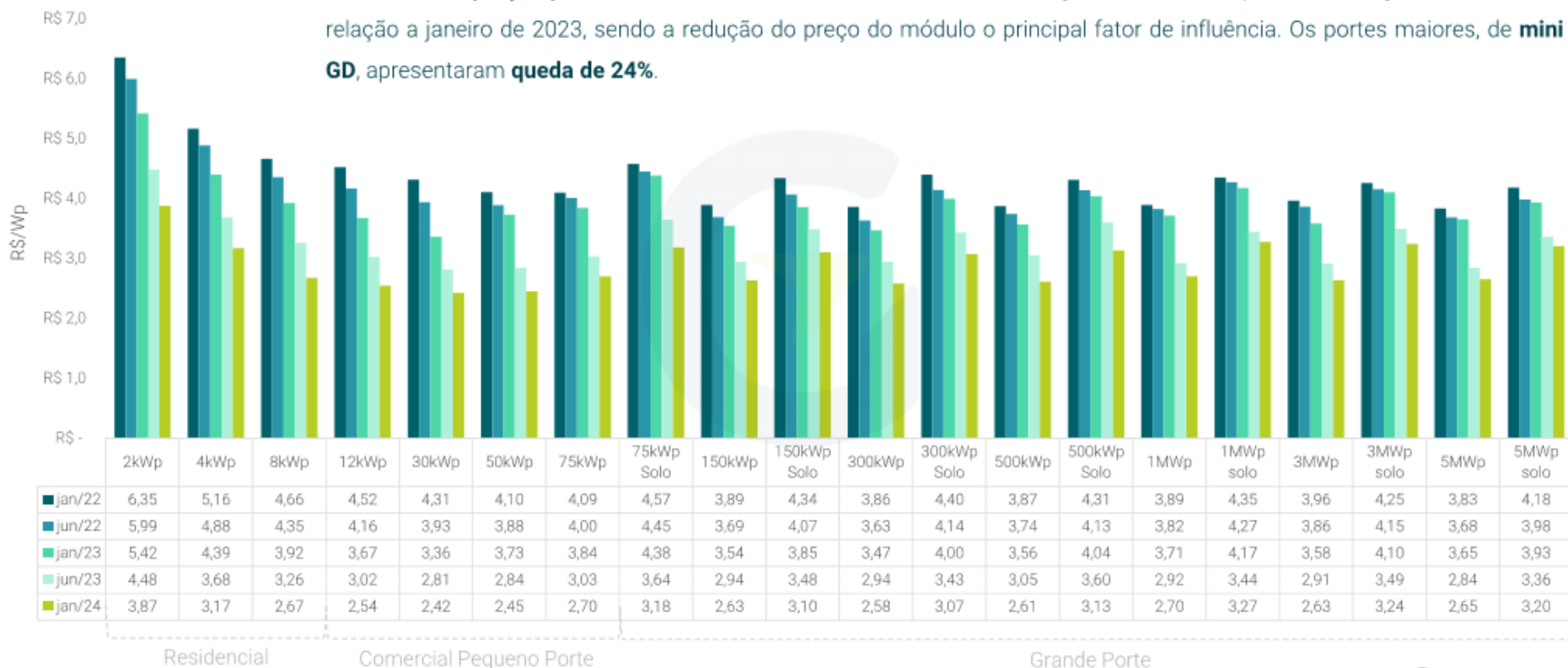


Percentual de Perdas de Produtividade Mensal Individual Comparado com o Padrão Limpo Mesa 7



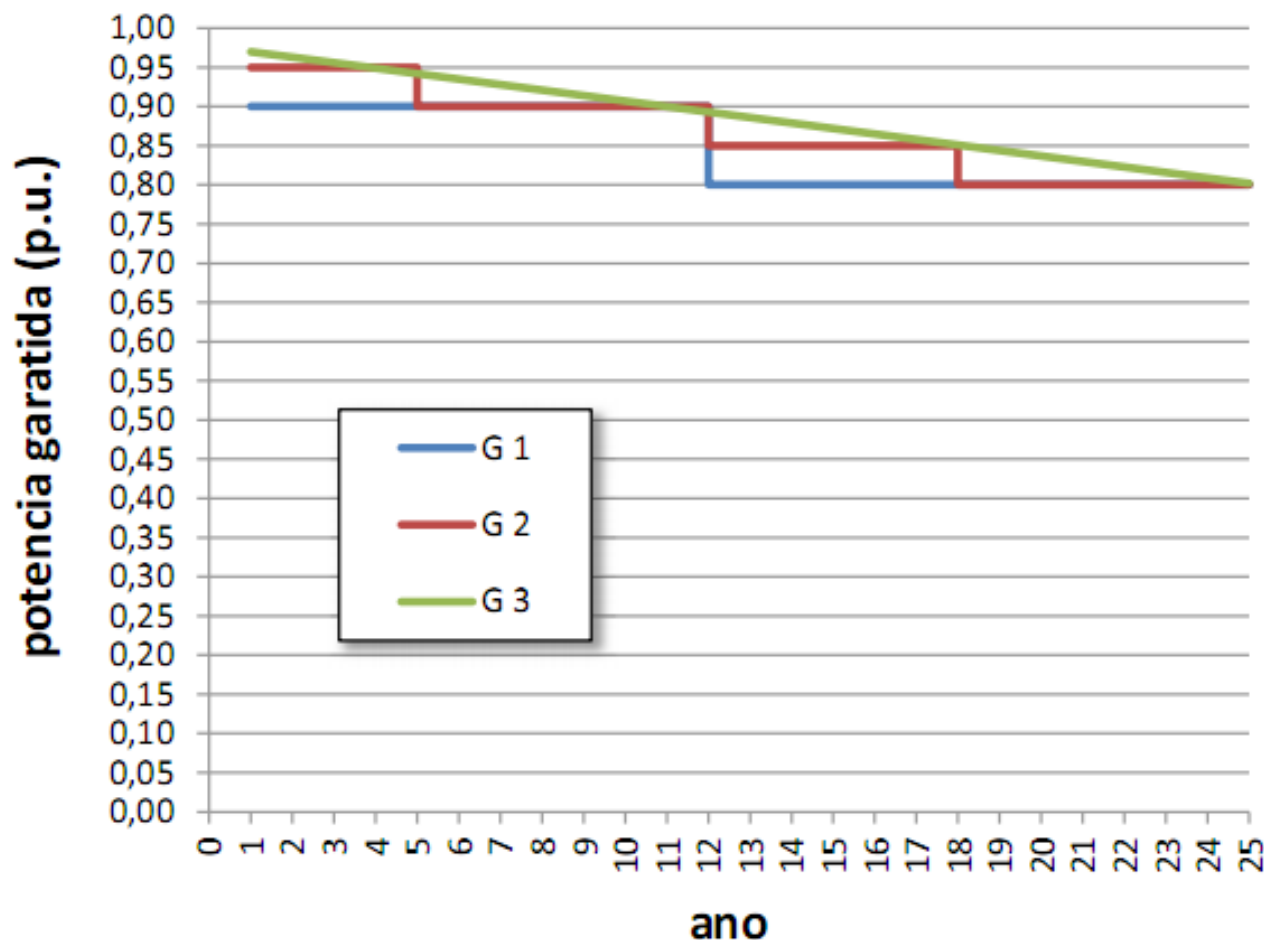
Dados de percentual de perda de produtividade mensal de cada mês em comparação com o padrão limpo da **mesa 7**.

➤ Em média, os **preços para o cliente final de sistemas de micro GD** em janeiro de 2024 apresentaram **queda de 30%** em relação a janeiro de 2023, sendo a redução do preço do módulo o principal fator de influência. Os portes maiores, de **mini GD**, apresentaram **queda de 24%**.



Fonte: Greener, 2024.

Células e módulos fotovoltaicos – Garantia de módulo FV c-Si



Degradação máxima de módulos, de acordo com 3 diferentes formas de garantia; G1: 90% -12 anos e 80% 25 anos; G2: 95% - 5 anos, 90% - 12 anos, 85% - 18 anos e 80% 25 anos; G3: 3% no primeiro ano e 0,7% por ano até 25 anos. A área sob as curvas é proporcional à geração de energia e, por inspeção, observa-se que a área sob G3 é maior do que as demais.

Células e módulos fotovoltaicos – Garantia de módulo FV c-Si

JA SOLAR

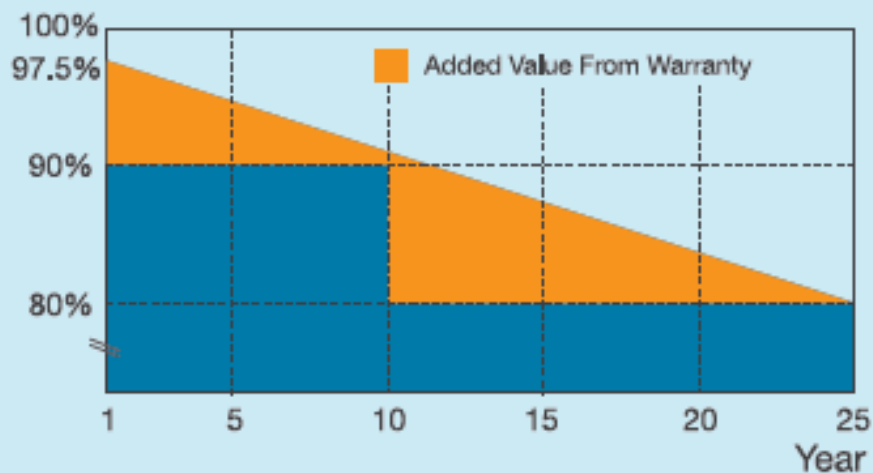
JAP6(K)

-72/310-330/4BB

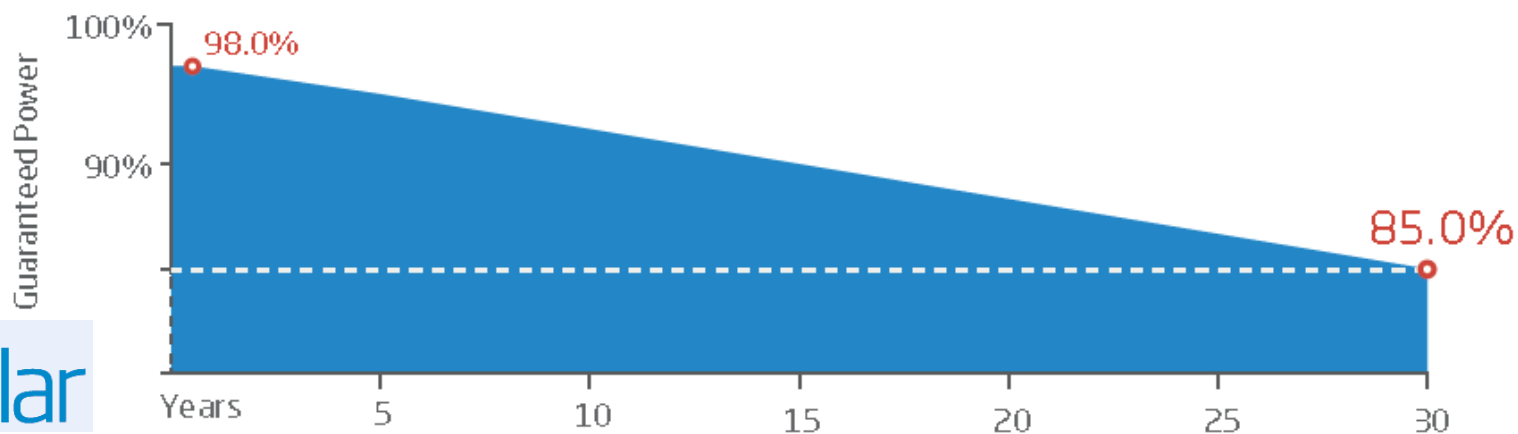
F 40-35

MULTICRYSTALLINE SILICON MODULE

- 12-year product warranty
- 25-year linear power output warranty



Trina Solar's Vertex Bifacial Dual Glass Performance Warranty



Trina solar

Componentes da string box

Como vimos, a string box é uma **parte importante dos sistemas fotovoltaicos**. Ela é composta por vários elementos que possuem funções específicas para garantir o seu pleno funcionamento.

Veja os principais:

- **Fusíveis:** são dispositivos de segurança que protegem os componentes elétricos de um sistema contra correntes elétricas excessivas. São projetados para queimar quando a carga de eletricidade ultrapassa o limite, interrompendo o circuito e evitando danos aos equipamentos subjacentes;
- **Disjuntores:** são interruptores automáticos que desligam o circuito em caso de sobrecarga ou curto-circuito. São projetados para proteger os cabos e os componentes elétricos da string box, cortando imediatamente a corrente quando ocorrem condições anormais;

•**Conectores:** são utilizados para conectar os cabos dos painéis solares à string box e os fios do inversor à rede elétrica. Eles garantem uma conexão segura, minimizando perdas de energia e reduzindo o risco de falhas devido a conexões soltas ou danificadas;

•**Dispositivos de proteção contra surtos:** foram feitos para proteger o sistema contra picos de tensão causados por descargas atmosféricas, falhas na rede elétrica ou outros eventos. Eles desviam o excesso de energia para o solo, protegendo os equipamentos conectados à string box;

•**Monitoramento e controle:** algumas string boxes também incorporam outros dispositivos que permitem acompanhar o desempenho do sistema em tempo real. Isso inclui a capacidade de monitorar a tensão, corrente e temperatura das strings de painéis solares, facilitando a detecção de problemas.

Quais são os tipos de inversores que existem?

Inversor solar grid-tie (inversor solar on grid)

O inversor solar grid-tie (ou inversor on grid) é o modelo mais utilizado no mundo, sendo o inversor usado para conectar um sistema fotovoltaico on grid à rede da sua residência ou empresa, o qual é projetado para se desligar rapidamente da rede elétrica caso ela venha a cair.

Inversor solar string (string inverter)

O inversor solar string é o inversor solar grid-tie, o tipo mais comumente utilizado em sistemas de energia solar residencial e empresarial. Ele representa 50% de todos inversores solares utilizados no mundo. Dependendo do tamanho da instalação, pode haver mais do que um inversor string.

Inversor solar off grid

Off grid significa “fora da rede” ou “desconectado da rede”.

O inversor solar off grid foi desenvolvido para sistemas de energia solar off grid, ou seja, sistemas fotovoltaicos desconectados da rede elétrica, ou seja, sistemas que usam baterias e estão, normalmente, em regiões onde não se tem acesso à rede elétrica.

Os inversores off grid convertem a corrente contínua (CC) a 12, 24 ou 48 Volts para a corrente alternada (CA) e, no Brasil, devem ter uma potência de 110/220 V e 60 Hz para fornecer energia a eletrônicos e eletrodomésticos convencionais.

Inversor solar híbrido

O inversor solar híbrido permite operar tanto conectado à rede quanto isolado dela. Ele é como se fosse um 2 em 1, ou seja, um inversor grid-tie e um inversor off grid juntos. Isso é uma forma simples de explicar um inversor solar híbrido, pois, na prática, eles podem fazer muito mais que isso, como, por exemplo, serem programados para injetar energia na rede nos horários em que a energia vale mais e armazenar a energia em baterias quando a energia é mais barata.

Microinversor solar

Microinversor solar é um inversor projetado para operar com um único painel solar. O microinversor converte a energia de corrente contínua de cada painel para corrente alternada. As vantagens do microinversor residem, principalmente, na operação independente de cada painel.

Inversor solar central

Inversores centrais são projetados para aplicações de grande porte, como edifícios, instalações de sistemas fotovoltaicos industriais e usinas solares. Eles são, basicamente, um grande inversor string.