



LABORATÓRIO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS - INSTITUTO DE ELETROTÉCNICA E ENERGIA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

## IEE0004 – APLICAÇÕES DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

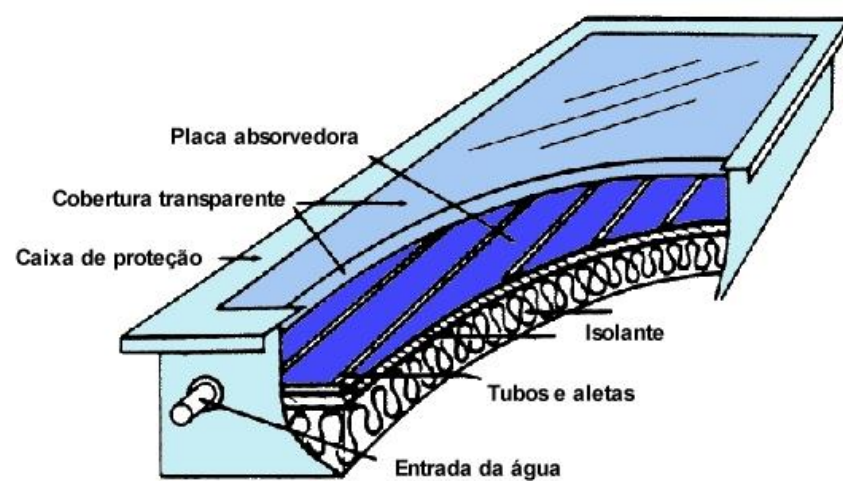
Adnei Melges de Andrade  
[adnei@usp.br](mailto:adnei@usp.br)

Roberto Zilles  
[zilles@usp.br](mailto:zilles@usp.br)

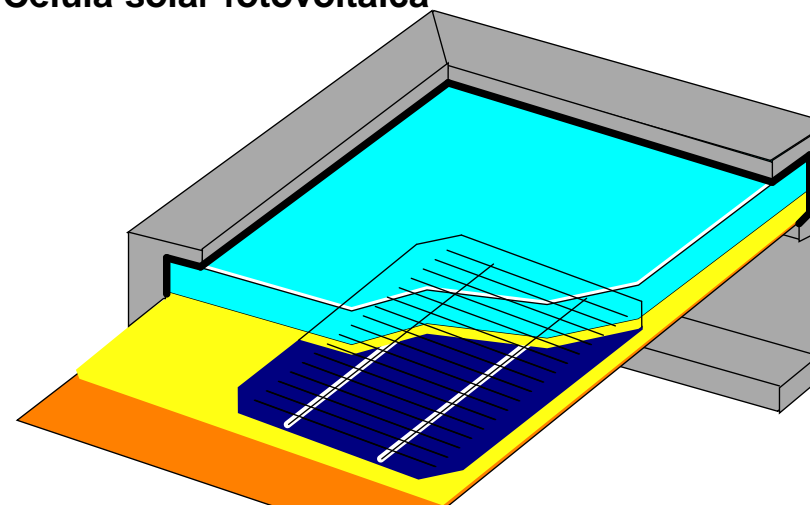
Monitor: Pedro Ferreira Torres  
[pftorres@iee.usp.br](mailto:pftorres@iee.usp.br)

## CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR

### Coletor Solar Térmico



### Célula solar fotovoltaica

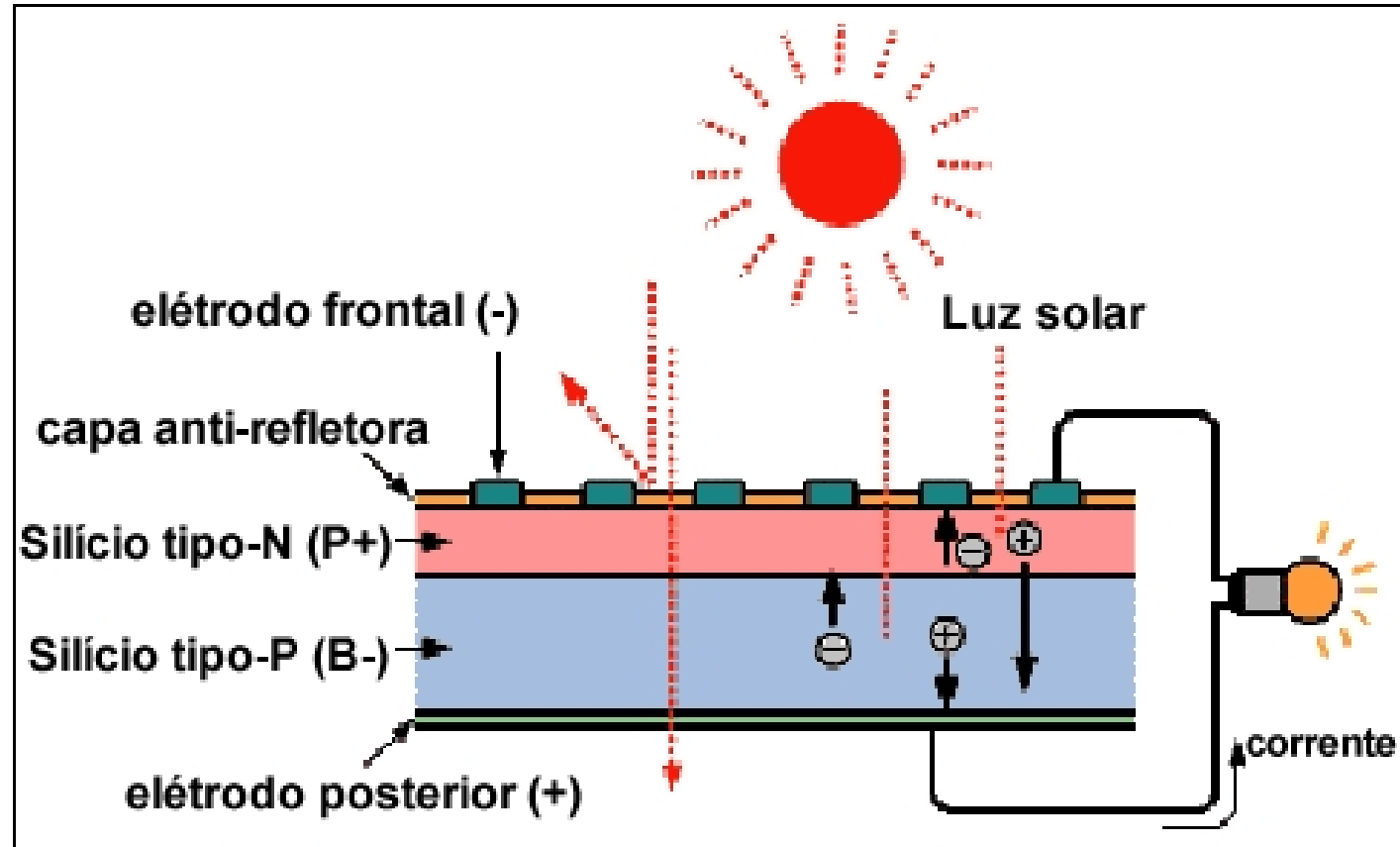


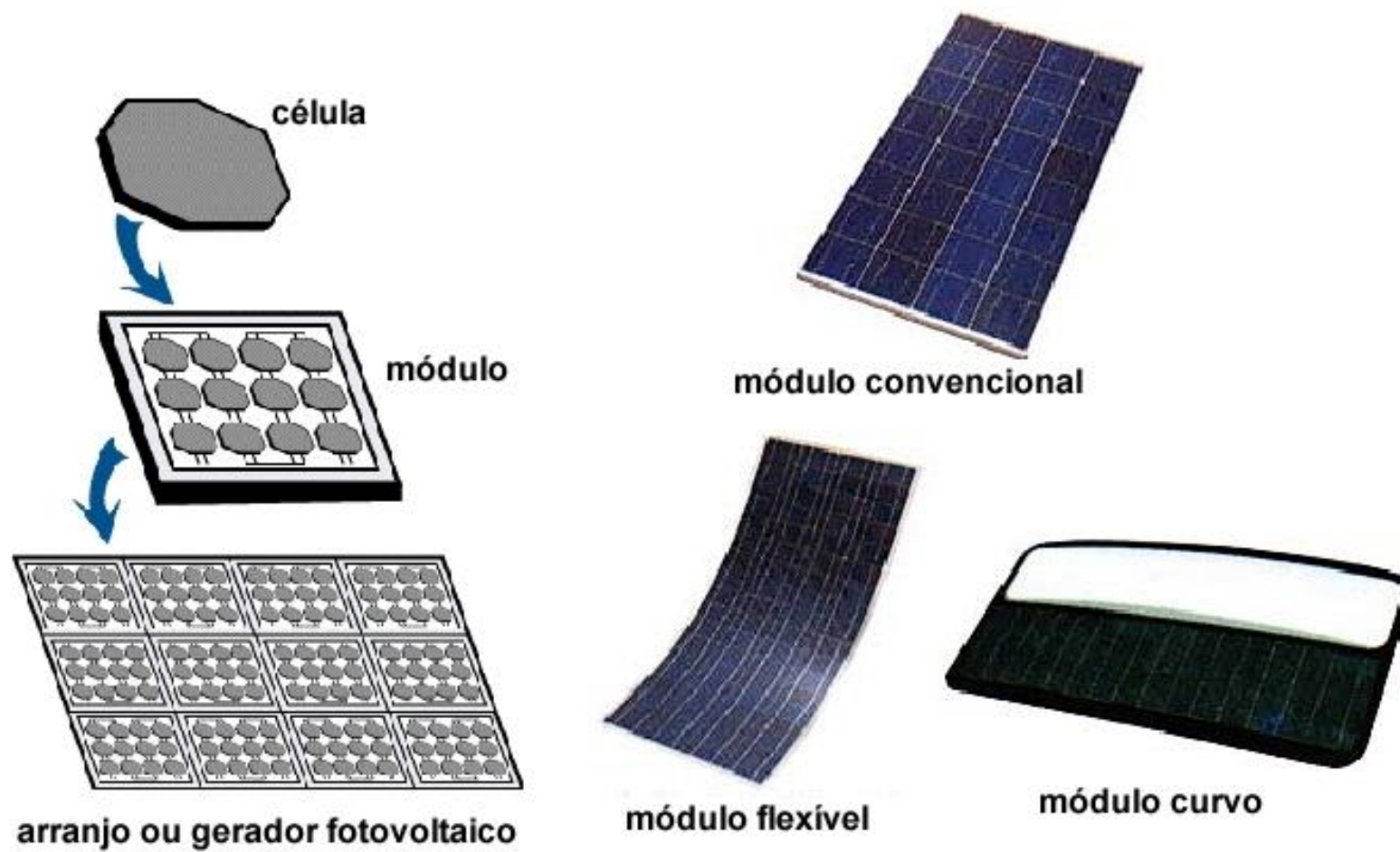
## A conversão da luz em eletricidade

# Conversão Fotovoltaica

- Conversão fotovoltaica é a conversão da energia solar diretamente em eletricidade através do efeito fotovoltaico.
- O dispositivo de conversão é chamado de **célula fotovoltaica**. Há várias tecnologias, mas dominam as células fabricadas com silício monocristalino ou com silício multicristalino.

## CÉLULA SOLAR FOTOVOLTAICA





## HISTORIA DE LA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

1839 O ponto de partida se considera a Edmund Bequerel, um físico francês descobrindo o efeito fotovoltaico quando experimentava com dois eletrodos metálicos em uma solução condutora, quando verificou um aumento da geração elétrica com a luz.

1873 Willoughby Smith descobre o efeito fotovoltaico em sólidos, no Selênio

1877 W.G.Adams y R.E.Day produzem a primeira célula fotovoltaica de Selênio

1954 Os pesquisadores D.M.Chaplin, C.S. Fuller y G.L.Pearson dos Laboratórios Bell em Murray Hill, New Jersey, produzem a primeira célula de Silício, publicam o artigo “A New Silicon p-n junction Photocell for converting Solar Radiation into Electrical Power” e fazem sua apresentação oficial em Washington (26 abril).

1954 Pearson, Chaplin e Fuller (Laboratorio da Bell Telephone)  
Célula de Si; eficiência  $> 5$



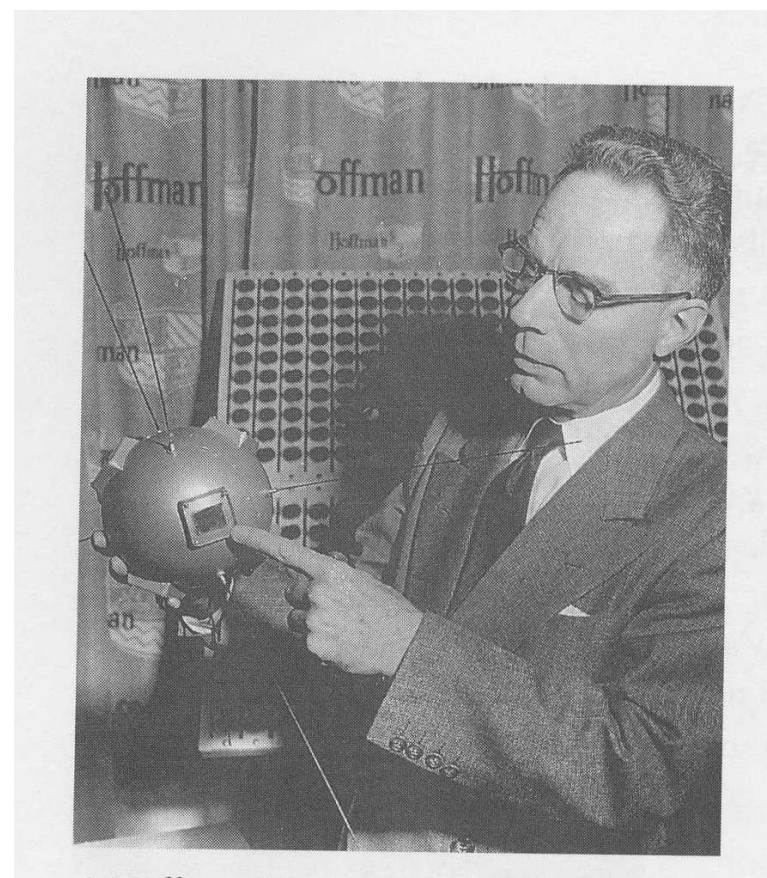
1955 É passada à indústria americana a tarefa de produzir elementos solares fotovoltaicos para aplicações espaciais. Hoffman Electronic, empresa de Illinois (EE.UU.) oferece células de 3% e de 14mW a 1.500 \$/Wp)

- Hoffman Electronic alcança 8 % de rendimento em suas células

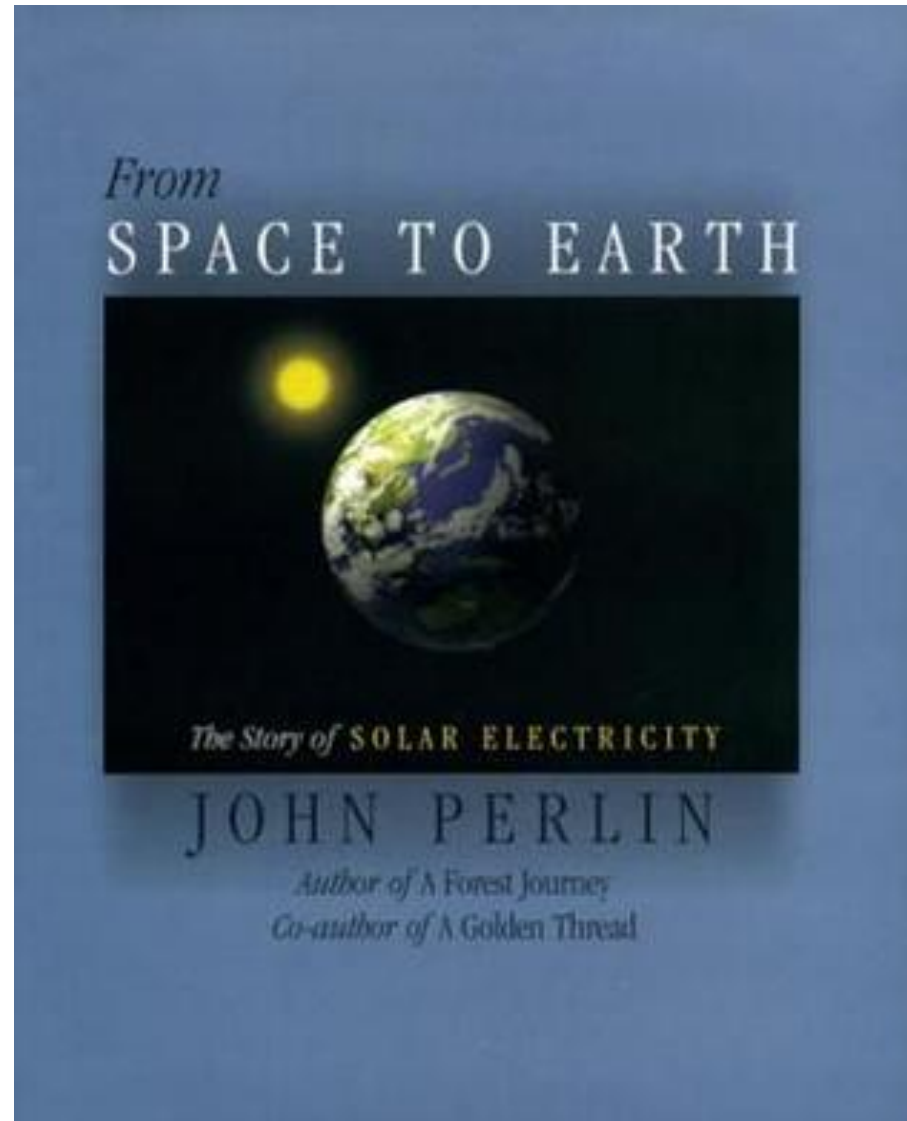
1958 Em 17 de março se lança o Vanguard I, o primeiro satélite alimentado com energia solar fotovoltaica. O satélite leva 0,1W em uma superfície aproximada de 100 cm<sup>2</sup>, para alimentar um transmissor de 5 mW, que esteve operativo por 8 anos. A União Soviética, mostra na exposição Universal de Bruxelas suas células fotovoltaicas com tecnologia de Silício.

O Vanguard I inaugura o uso espacial de células solares

O Spunik III, também com células solares é lançado três semanas depois



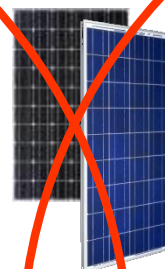


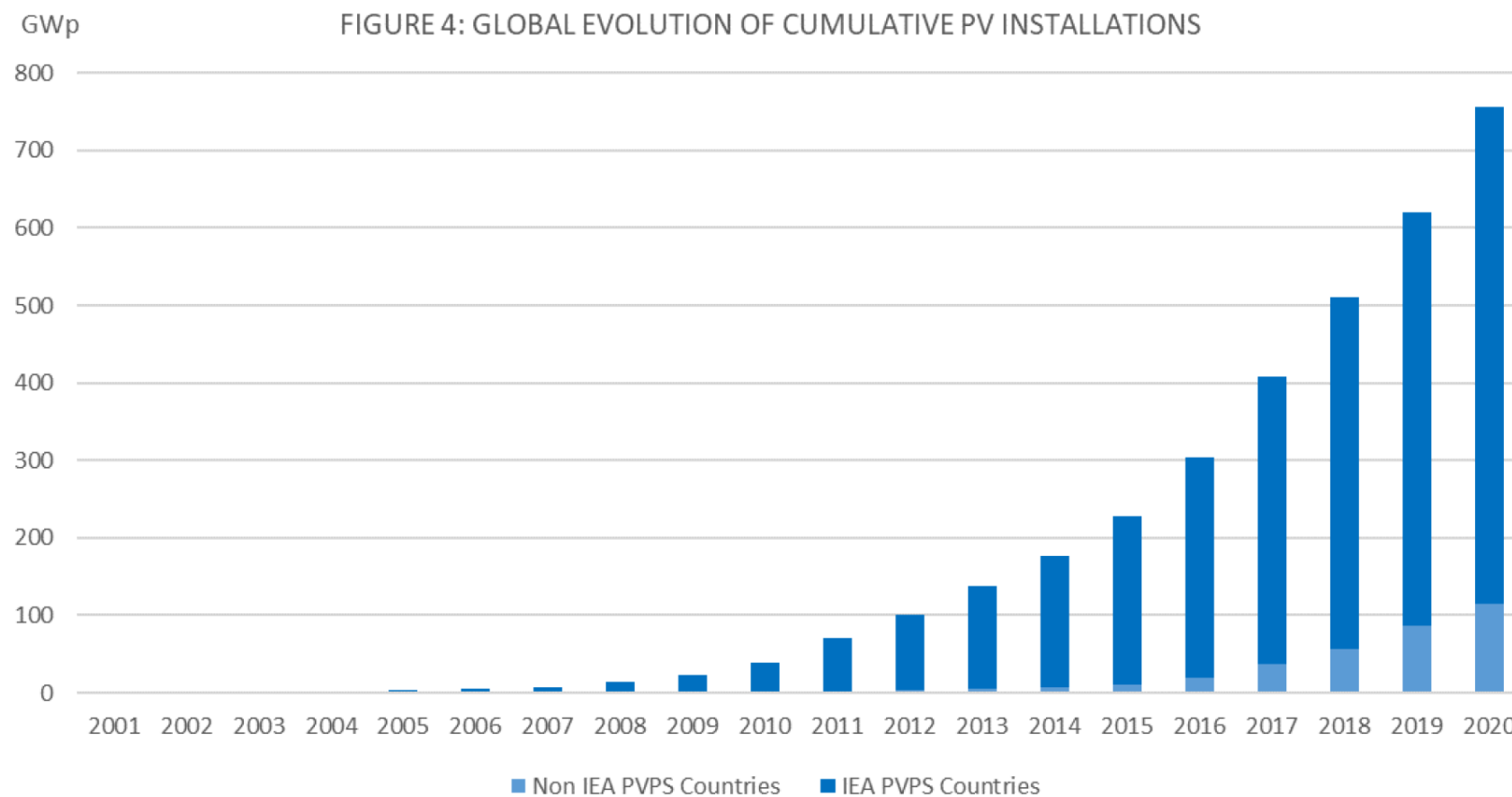


ISBN: 0937948144.

# CADEIA DE VALOR DA INDÚSTRIA FOTOVOLTAICA

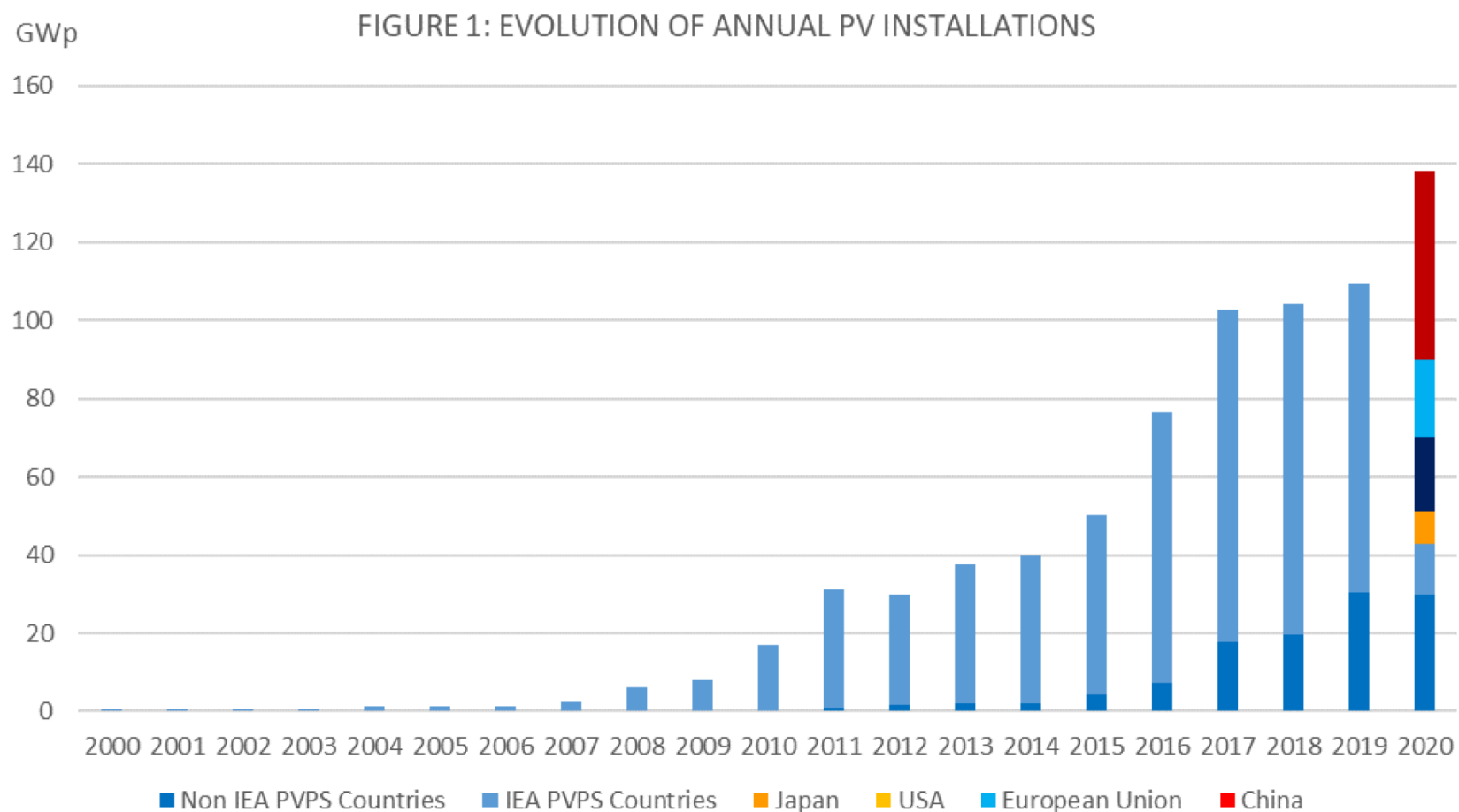
## Introdução



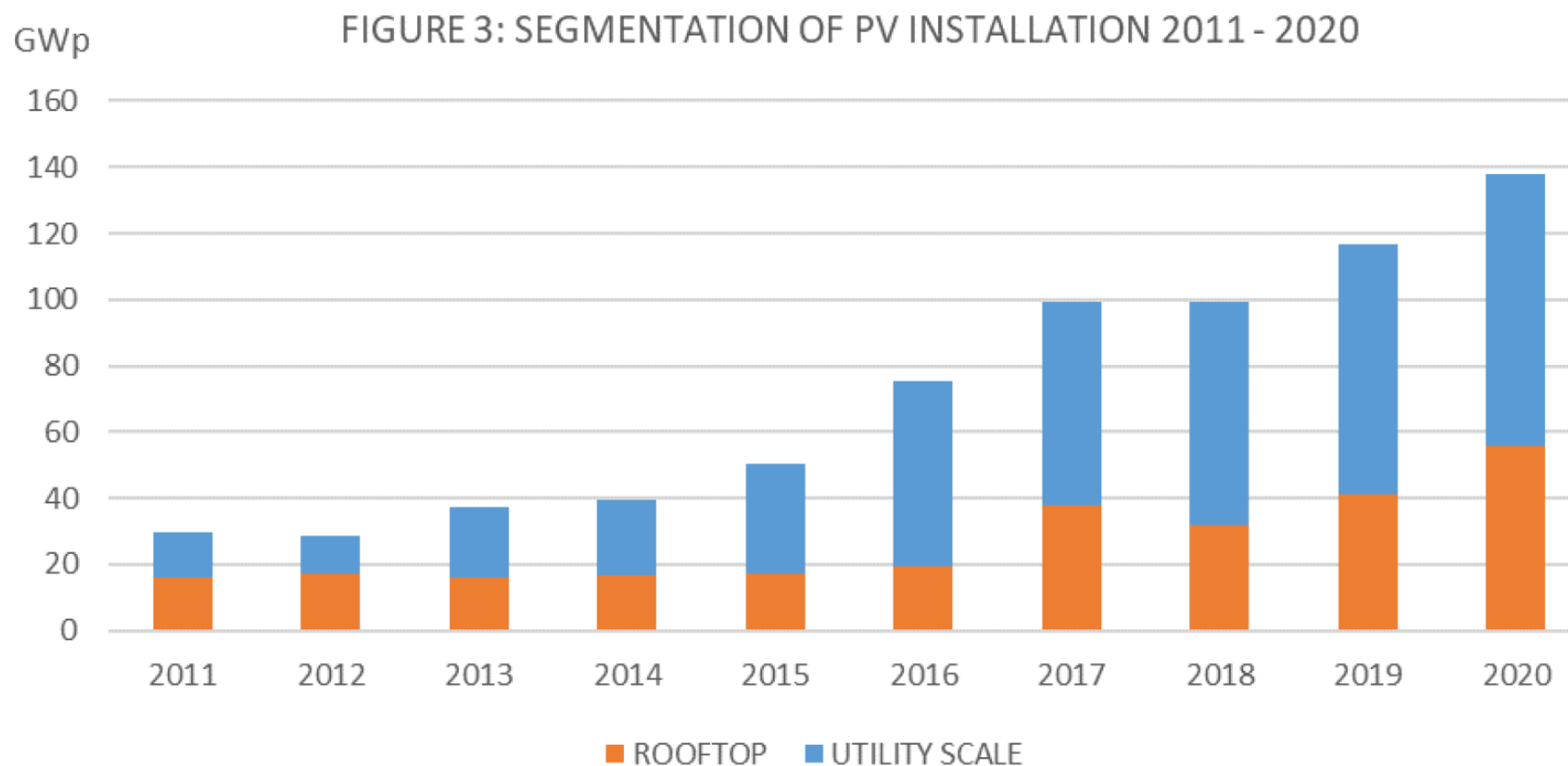


Fonte: Report IEA PVPS T1-39:2021 - *Snapshot of Global PV Markets (2021, April)*

## CAPACIDADE FOTOVOLTAICA INSTALADA ANUALMENTE (GW – c.c.)



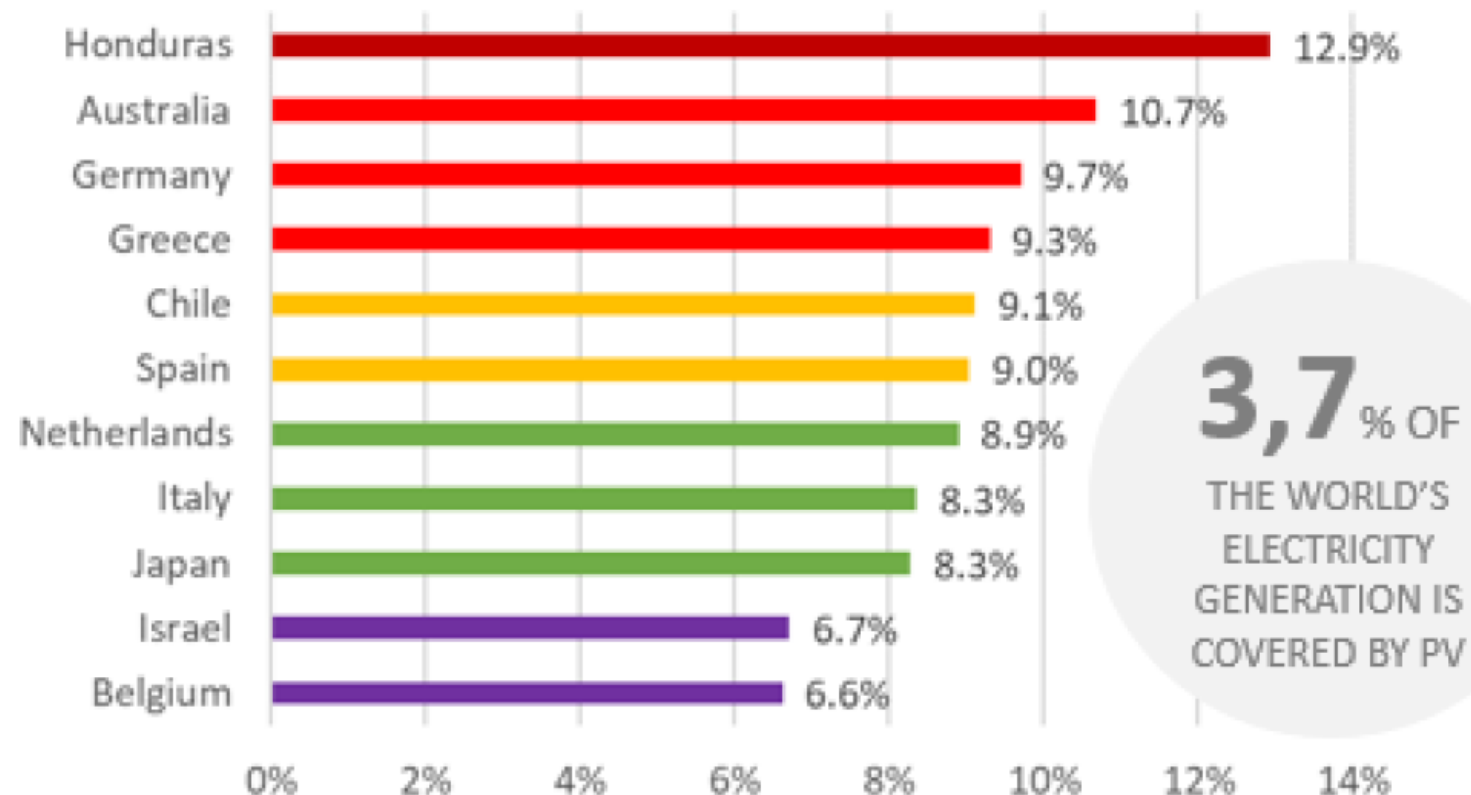
Fonte: Report IEA PVPS T1-39:2021 - *Snapshot of Global PV Markets (2021, April)*



Fonte: Report IEA PVPS T1-39:2021 - *Snapshot of Global PV Markets (2021, April)*

## CONTRIBUIÇÃO DA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA NA DEMANDA ELÉTRICA DE ALGUNS PAÍSES, 2020

## COUNTRIES WITH HIGHEST PV PENETRATION



Fonte: Report IEA PVPS T1-39:2021 - Snapshot of Global PV Markets (2021, April)

[https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA\\_PVPS\\_Snapshot\\_2021-V3.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA_PVPS_Snapshot_2021-V3.pdf)

## Sistemas fotovoltaicos conectados à rede – Centrais solares



4 MW em Jaén, Espanha



42 MW em Moura, Portugal





Residencias - Alemanha

## SISTEMAS ISOLADOS



SIGFI 13, Projeto LSF-IEE, Mimirauá, AM



Bombeamento, Projeto LSF-IEE, ITESP, Presidente Bernardes, SP  
Bomba e condicionamento de potência de fabricação nacional



Sistemas individuais – Resolução ANEEL 83/2004

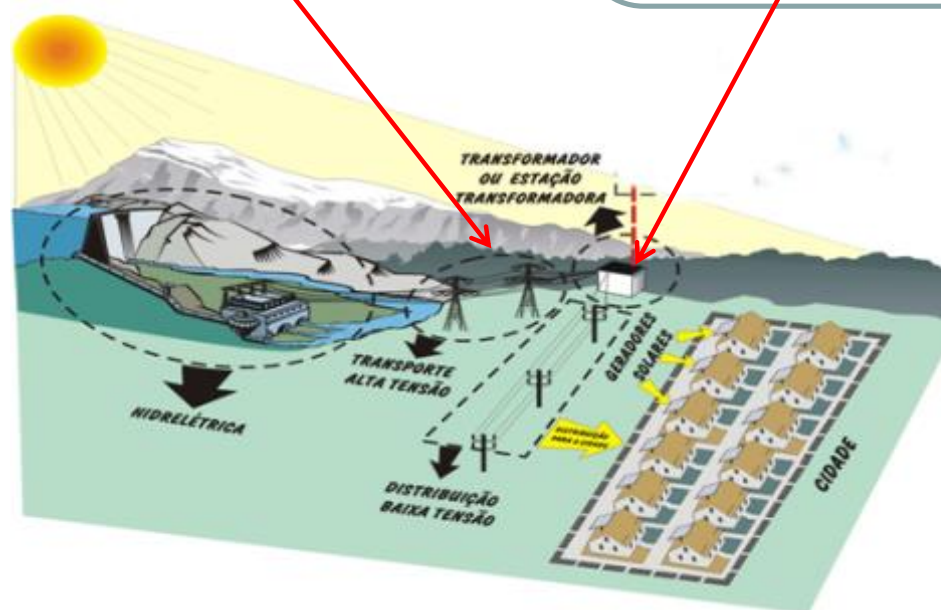


Minirredes em sistemas isolados



**RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 493, DE 5 DE JUNHO DE 2012.**

Estabelece os procedimentos e as condições de fornecimento por meio de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica – MIGDI ou Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente – SIGFI.

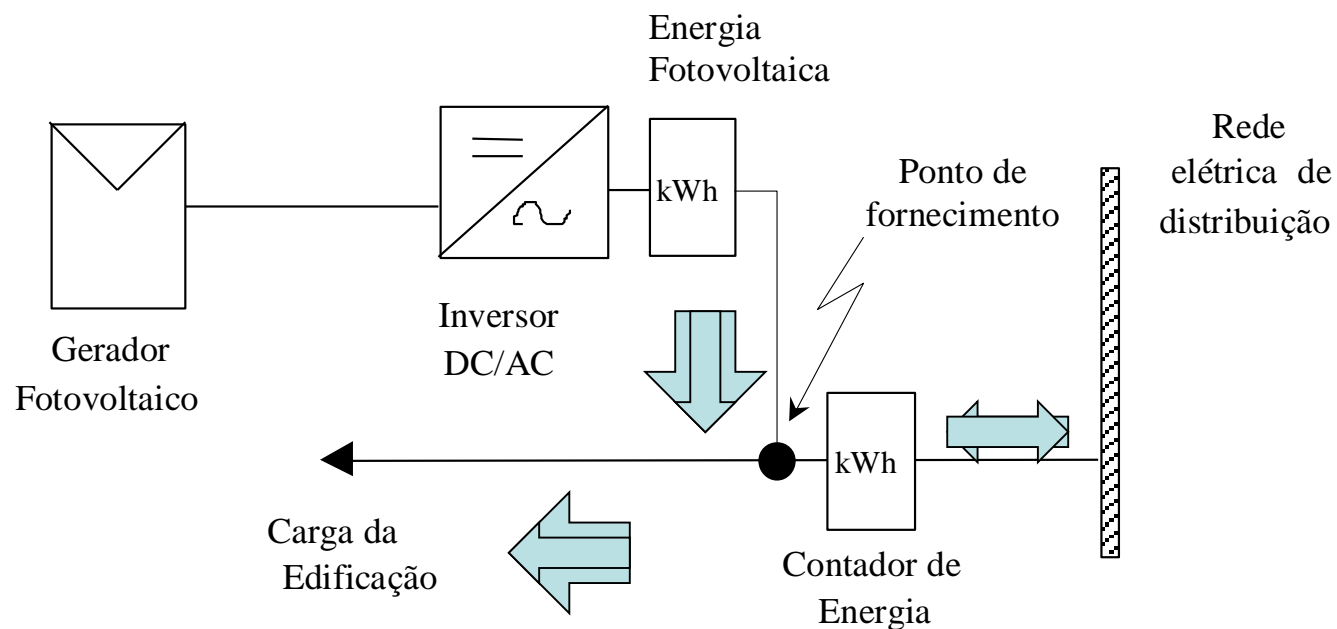


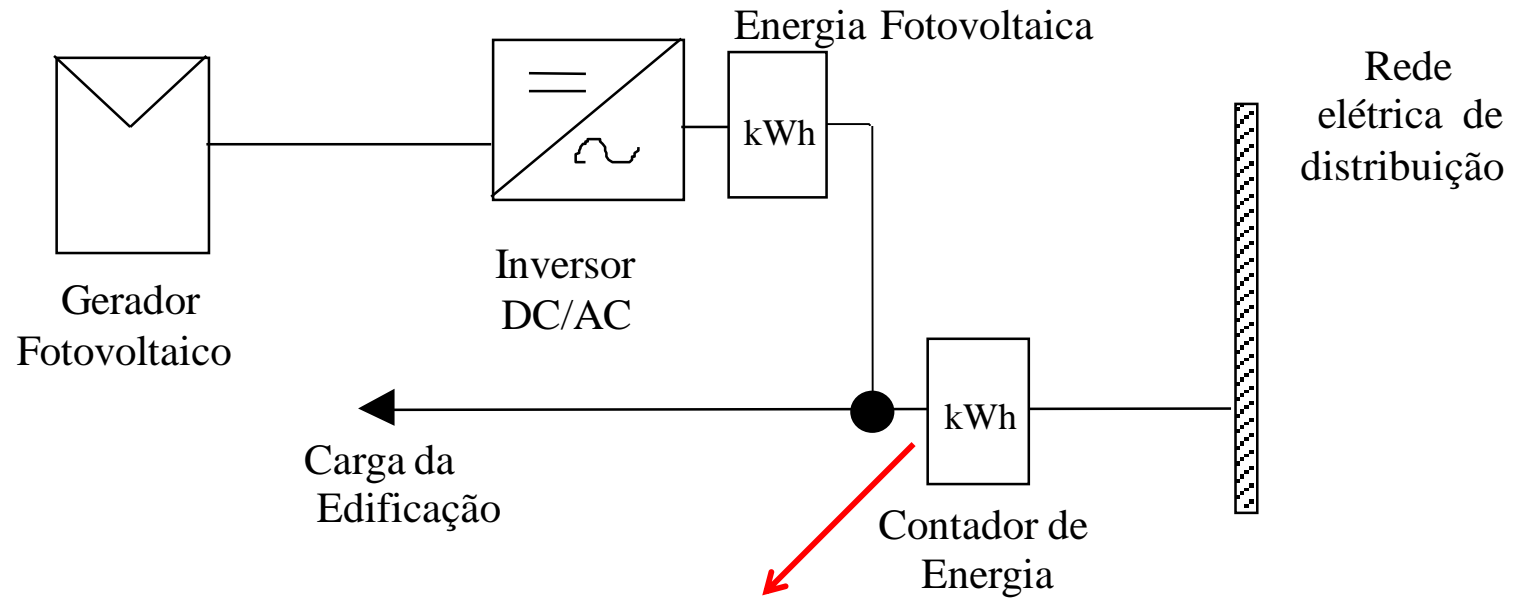
## RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012 (Nº 687/2015)

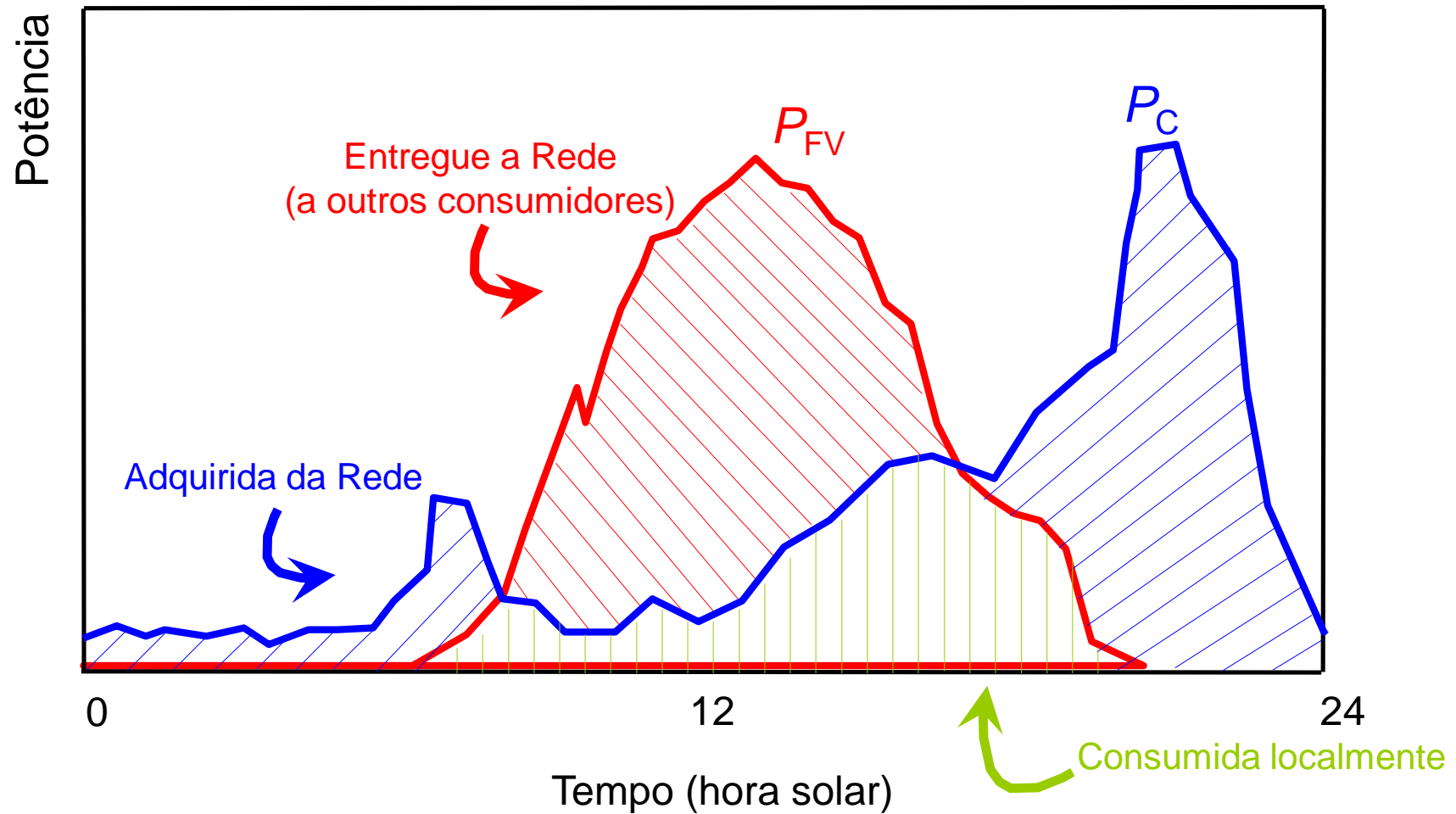
Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

## GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EM EDIFICAÇÕES

São unidades de geração que, além de consumidoras de energia, passam a produzir parte da energia necessária, podendo, em algumas situações verter o excedente à rede de distribuição de eletricidade.







RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012 [Resolução Normativa nº 687/2015](#)

Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

## Exemplos de casas com sistemas fotovoltaicos instalados





# Telhas





Megawatt Solar: 1,1 MWp instalado sobre a cobertura do Edifício Sede da Eletrosul e de estacionamentos, instalado na cidade de Florianópolis, SC (UFSC;2014).



Usina FV Fernando de Noronha I, 400 kWp (CELPE)

## Usina solar fotovoltaica da USP



**540 kWp, IEE-USP**

## Sistema Central, 156 kWp



## Sistema BAPV, 156 kWp (Telhado do IEB, Biblioteca Brasileira)



## Sistema BIPV, 150 kWp (estacionamento do IEE-USP)



## Sistema BIPV, 150 kWp (estacionamento do IEE-USP)





## O PRÉDIO DA ADMINISTRAÇÃO DO IEE-USP

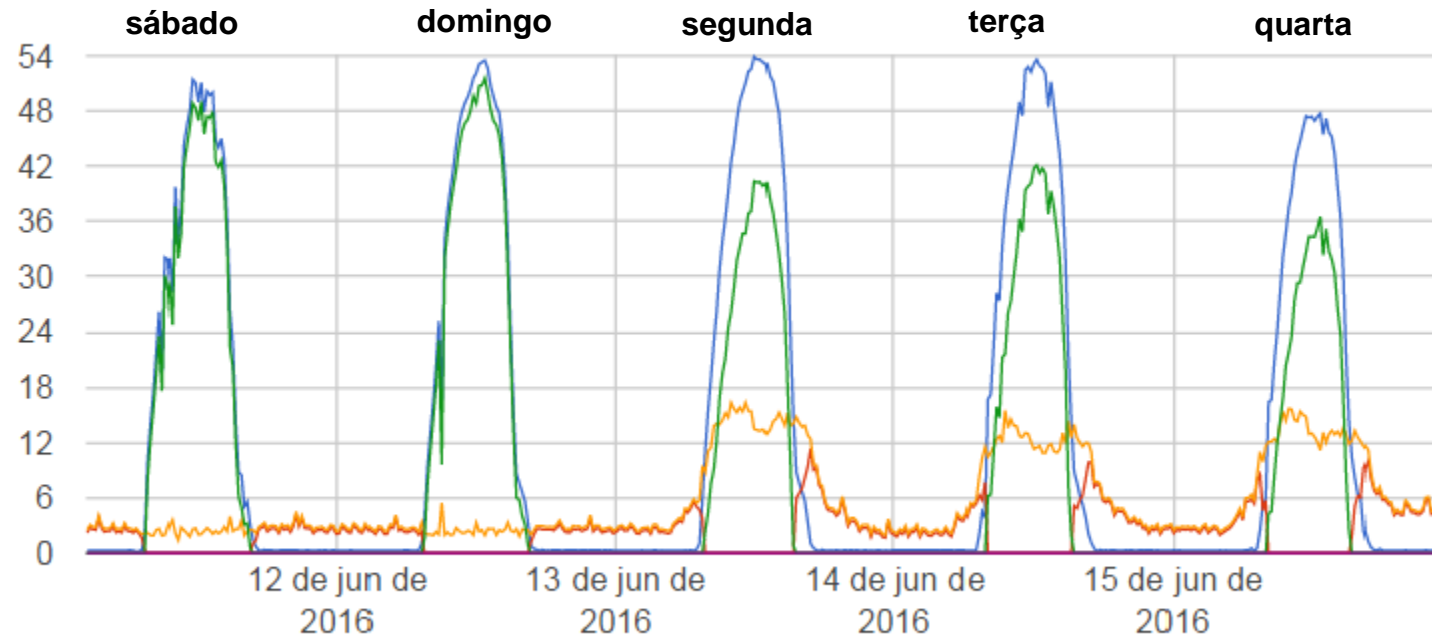


**12 kWp**



**78 kWp**

## Potência instantânea



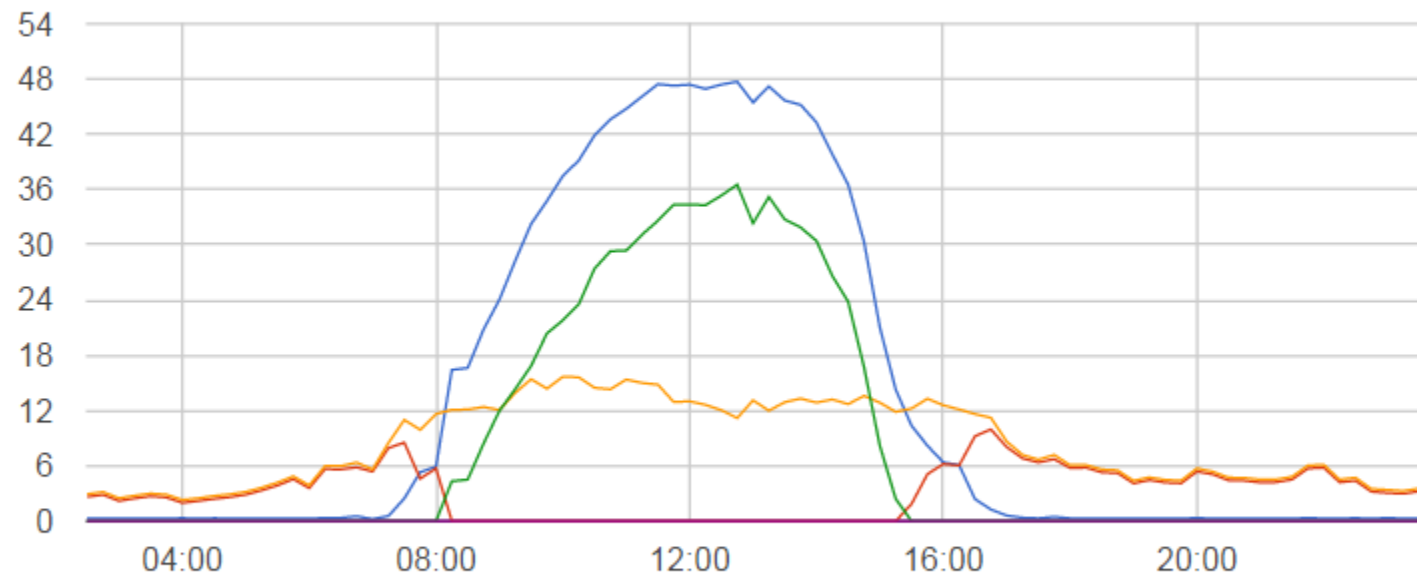
Da data:

até a data:

- Geracao Fotovoltaica [kW]
- Potencia demandada da rede [kW]
- Demanda total [kW]
- Potencia injetada na rede [kW]

## Potência instantânea

quarta



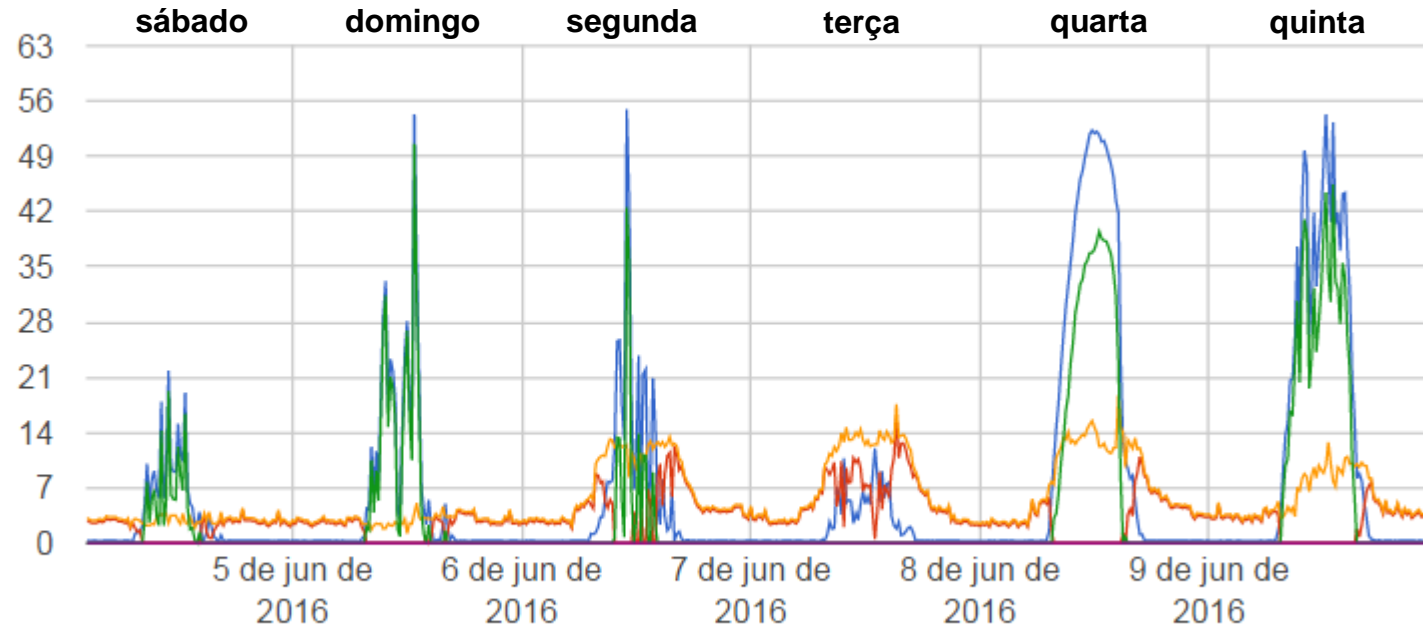
Da data: 15-06-2016 02:16:43

até a data: 15-06-2016 23:50:43

Atualiza

- Geracao Fotovoltaica [kW]
- Potencia demandada da rede [kW]
- Demanda total [kW]
- Potencia injetada na rede [kW]

## Potência instantânea

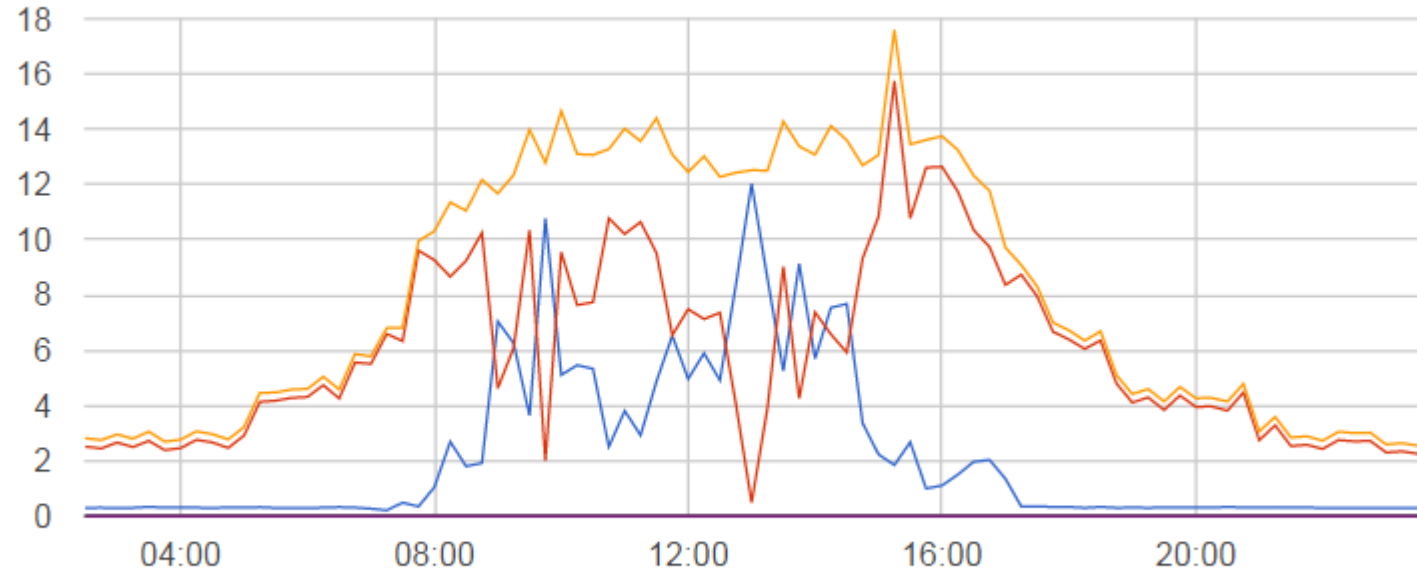


Da data:

até a data:

## Potência instantânea

terça



Da data: 07-06-2016 02:16:43

até a data: 07-06-2016 23:50:43

Atualiza

- Geracao Fotovoltaica [kW]
- Potencia demandada da rede [kW]
- Demanda total [kW]
- Potencia injetada na rede [kW]



## Geração Distribuída



**AGENTE**: Todos  
**MUNICÍPIO**: Todos  
**REGIÃO**: Todos  
**FONTE DE GERAÇÃO**: Todos  
**MODALIDADE DE GERAÇÃO**: Todos  
**CLASSE DE CONSUMO**: Todos

Qtd de GDs  
**857.715**

Municípios com GD  
**5.456**

PERÍODO DE CONEXÃO  
13/12/2008 25/02/2022

UCs Rec Créditos  
**1.102.034**

Pot Instalada (kW)  
**9.468.895,58**



ANO CONEXÃO  
Todos

GRUPO DE TENSÃO  
Todos

FAIXA DE POTÊNCIA (kW)  
0,00 5.000,00

ESTADOS  
Todos

TIPO DE GERAÇÃO  
Todos



AGENTES			
AGENTE	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
AME	3.414	4.448	55.212,78
<b>Total</b>	<b>857.715</b>	<b>1.102.034</b>	<b>9.468.895,58</b>

REGIÃO			
REGIAO	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
Centro Oeste	113.593	138.982	1.504,8
<b>Total</b>	<b>857.715</b>	<b>1.102.034</b>	<b>9.468.895,58</b>



LEGENDA POR TIPO	
UFV	857.173
UTE	378
EOL	89
CGH	75

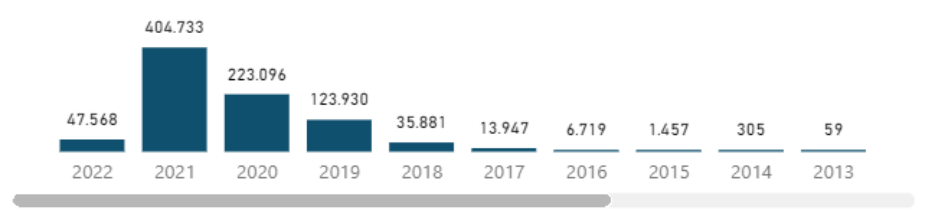
MUNICÍPIOS			
MUNICUF	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
Abadia de Goiás - GO	227	269	1.718,8
<b>Total</b>	<b>857.715</b>	<b>1.102.034</b>	<b>9.468.895,58</b>

ESTADOS			
UF2	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
AC	2.100	2.296	23.882,78
AL	6.863	10.729	81.908,63
<b>Total</b>	<b>857.715</b>	<b>1.102.034</b>	<b>9.468.895,58</b>

FONTE DE GERAÇÃO			
COMBUSTÍVEL	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
Bagaço de Cana de Açúcar	14	303	8.226,96
<b>Total</b>	<b>857.715</b>	<b>1.102.034</b>	<b>9.468.895,58</b>

ANO DA CONEXÃO			
ANO	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
2022	47.568	57.898	425.894,90
2021	404.733	507.441	3.966.540,77
<b>Total</b>	<b>857.715</b>	<b>1.102.034</b>	<b>9.468.895,58</b>

QUANTIDADE ANUAL DE CONEXÃO



MODALIDADE DE GERAÇÃO			
MODALIDADE	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
Autoconsumo remoto	130.260	369.031	1.961.657,8
<b>Total</b>	<b>857.715</b>	<b>1.102.034</b>	<b>9.468.895,58</b>

TIPO DE GERAÇÃO			
TIPO	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
CGH	75	17.176	67.721,67
EOL	89	158	16.655,10
<b>Total</b>	<b>857.715</b>	<b>1.102.034</b>	<b>9.468.895,58</b>





## Geração Distribuída



<b>AGENTE</b>	<b>REGIÃO</b>	<b>MODALIDADE DE GERAÇÃO</b>
Todos	Todos	Todos
<b>MUNICÍPIO</b>	<b>FONTE DE GERAÇÃO</b>	<b>CLASSE DE CONSUMO</b>
Todos	Todos	Todos

AGENTES			
AGENTE	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
AME	3.414	4.448	55.212,78
<b>Total</b>	<b>857.173</b>	<b>1.078.123</b>	<b>9.269.055,84</b>

MUNICÍPIOS			
MUNICÍPIO	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
Abadia de Goiás - GO	227	269	1.712,84
<b>Total</b>	<b>857.173</b>	<b>1.078.123</b>	<b>9.269.055,84</b>

FONTES DE GERAÇÃO			
COMBUSTÍVEL	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
Radiação solar	857.173	1.078.123	9.269.055,84
<b>Total</b>	<b>857.173</b>	<b>1.078.123</b>	<b>9.269.055,84</b>

MODALIDADE DE GERAÇÃO			
MODALIDADE	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
Autoconsumo remoto	130.149	346.522	1.882.612,84
<b>Total</b>	<b>857.173</b>	<b>1.078.123</b>	<b>9.269.055,84</b>

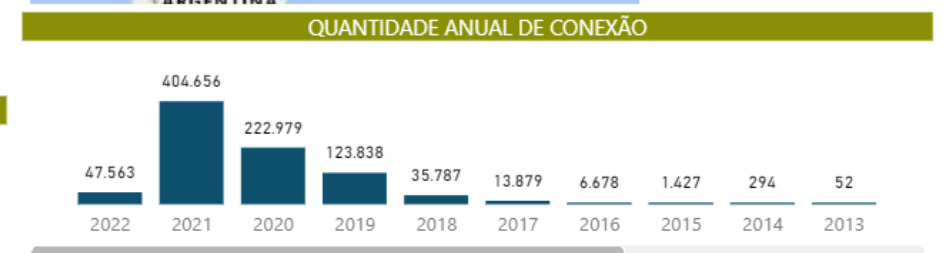
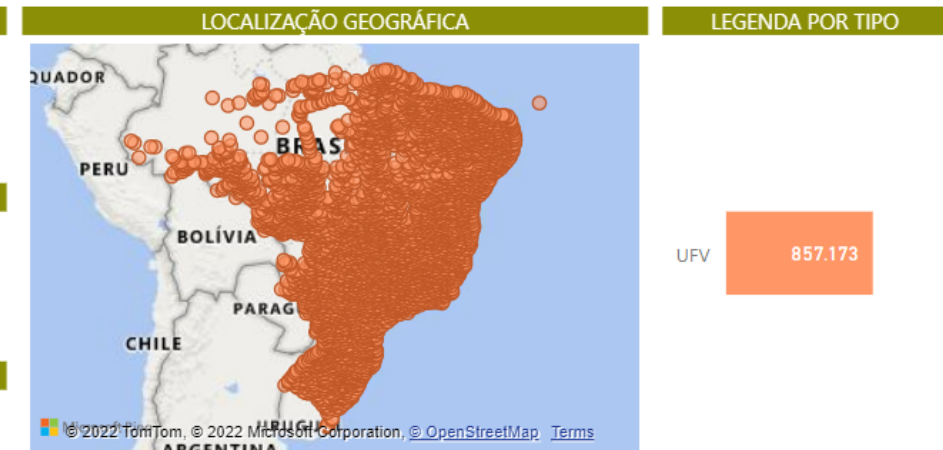
REGIÃO			
REGIÃO	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
Centro Oeste	113.521	138.805	1.473.123,84
<b>Total</b>	<b>857.173</b>	<b>1.078.123</b>	<b>9.269.055,84</b>

ESTADOS			
UF2	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
AC	2.100	2.296	23.882,78
AL	6.862	10.576	81.108,63
<b>Total</b>	<b>857.173</b>	<b>1.078.123</b>	<b>9.269.055,84</b>

ANO DA CONEXÃO			
ANO	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
2022	47.563	57.891	424.394,38
2021	404.656	506.136	3.946.620,61
<b>Total</b>	<b>857.173</b>	<b>1.078.123</b>	<b>9.269.055,84</b>

TIPO DE GERAÇÃO			
TIPO	QTD GD	UCs REC CRÉDITOS	POT INSTALADA (kW)
UFV	857.173	1.078.123	9.269.055,84
<b>Total</b>	<b>857.173</b>	<b>1.078.123</b>	<b>9.269.055,84</b>

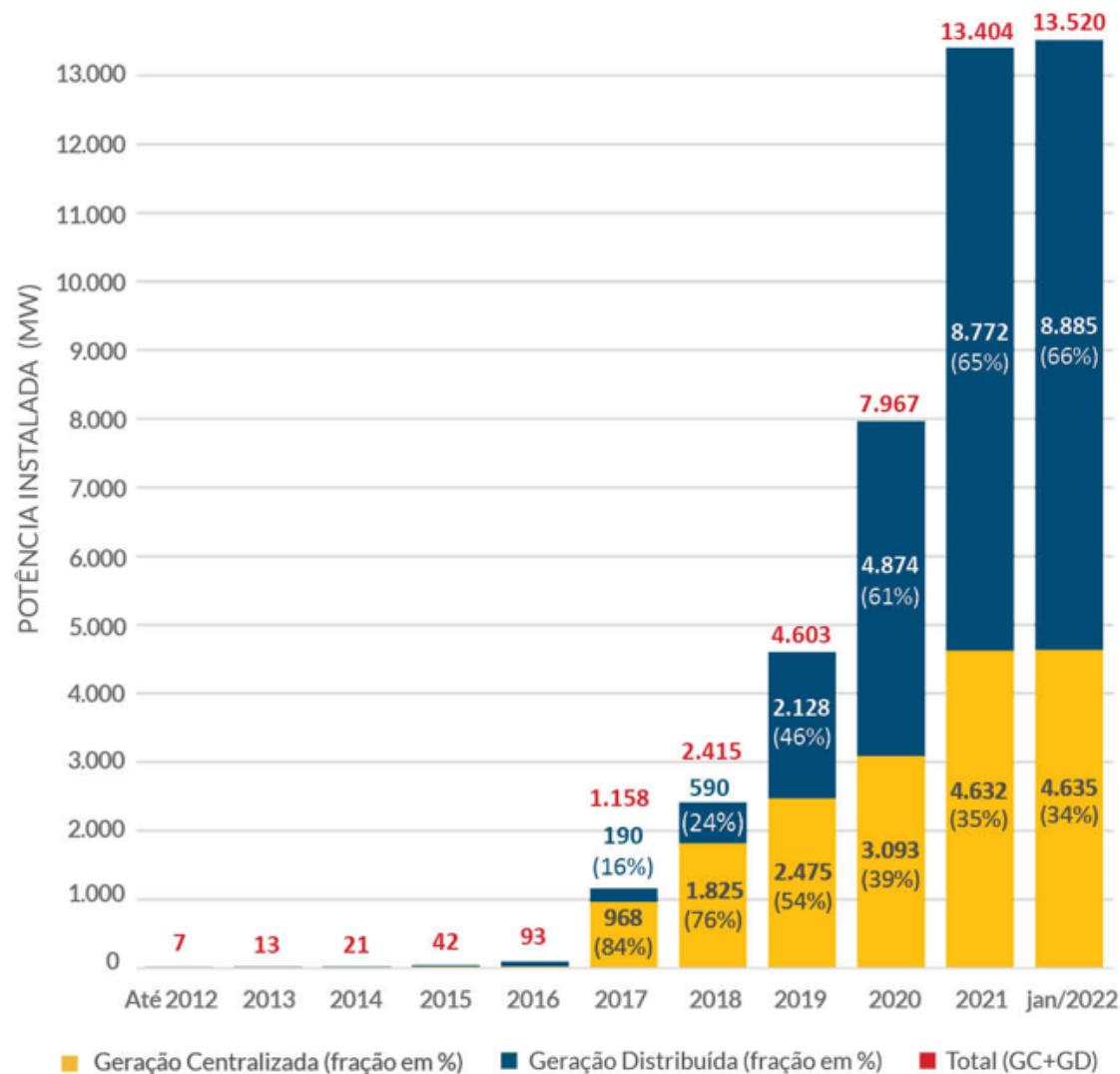
<b>Qtd de GDs</b> <b>857.173</b>	<b>Municípios com GD</b> <b>5.456</b>	<b>PERÍODO DE CONEXÃO</b> 13/12/2008 - 25/02/2022
<b>UCs Rec Créditos</b> <b>1.078.123</b>	<b>Pot Instalada (kW)</b> <b>9.269.055,84</b>	<b>FAIXA DE POTÊNCIA (kW)</b> 0,00 - 5.000,00
<b>ANO CONEXÃO</b> Todos	<b>GRUPO DE TENSÃO</b> Todos	<b>TIPO DE GERAÇÃO</b> UFV
<b>ESTADOS</b> Todos		



<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoizjM4NjM0OWYtN2lwZS00YjVlTlIiMjItN2E5MzBkN2ZlMzVkIiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVhYjYtNDZhMjI0MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOiR9>

# Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil

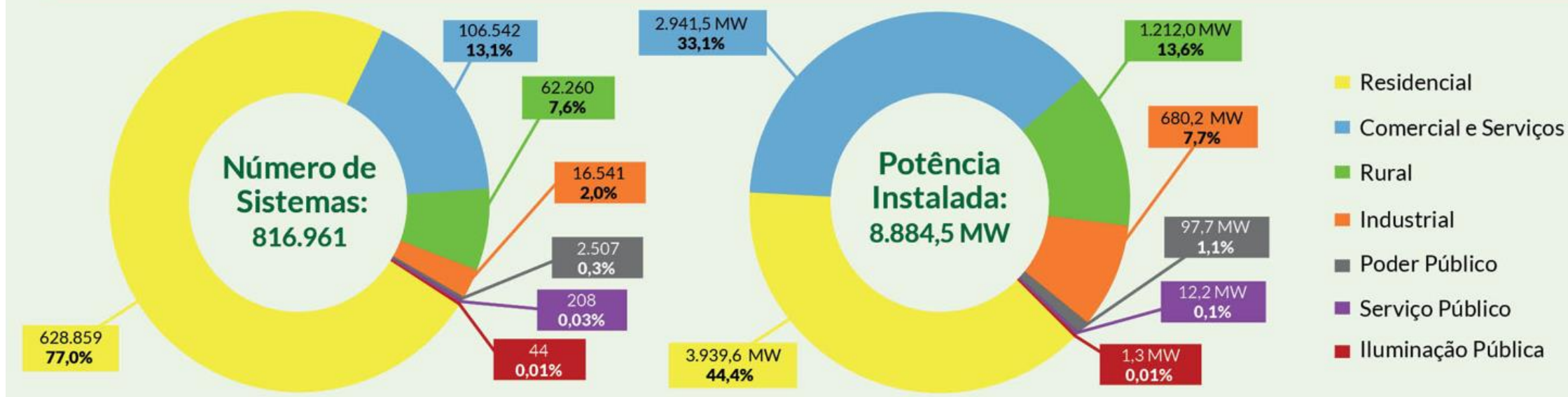
Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.



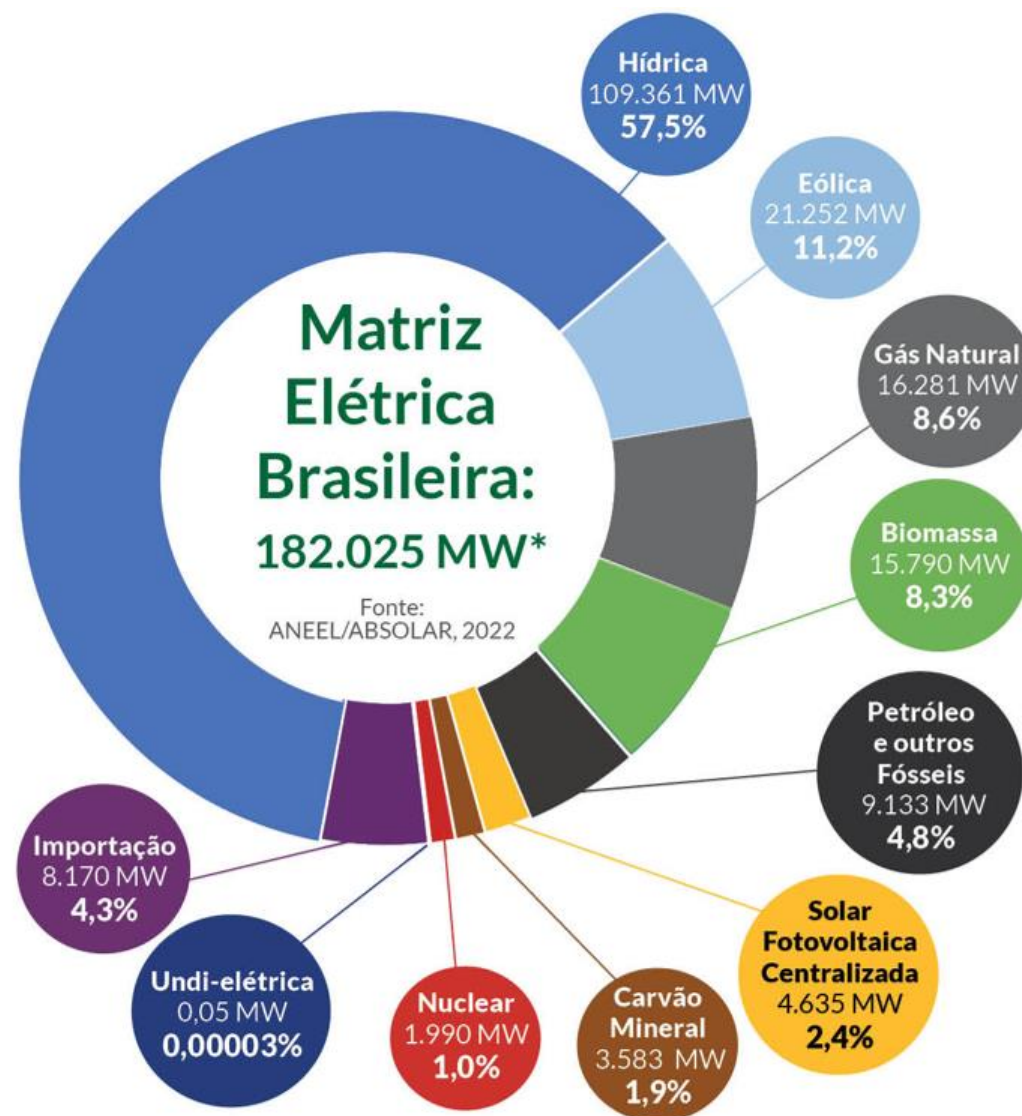


## Geração Distribuída Solar FV no Brasil por Classe de Consumo

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.



## GERAÇÃO CENTRALIZADA



\*A potência total da matriz não inclui a importação.

Atualizado em 02/02/2022

## Recordes de Geração de Energia

Fontes: ONS/MME, 2022.

A fonte solar fotovoltaica atingiu novos recordes de geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN):



### MÉDIA DIÁRIA

05/10/2021

**1.322**MW médios  
atendendo a**1,8%**da demanda por  
eletricidade do Brasil

### MÁXIMA DIÁRIA

28/09/2021

**3.626 MW**às 10h52  
equivalente a**4,7%**da demanda nacional  
naquele instante**1,7%**da oferta de energia  
elétrica no Brasil foi  
gerada pela fonte  
solar fotovoltaica em  
janeiro de 2022.

# Evolução do Preço da Fonte Solar Fotovoltaica em Leilões de Energia no Mercado Regulado

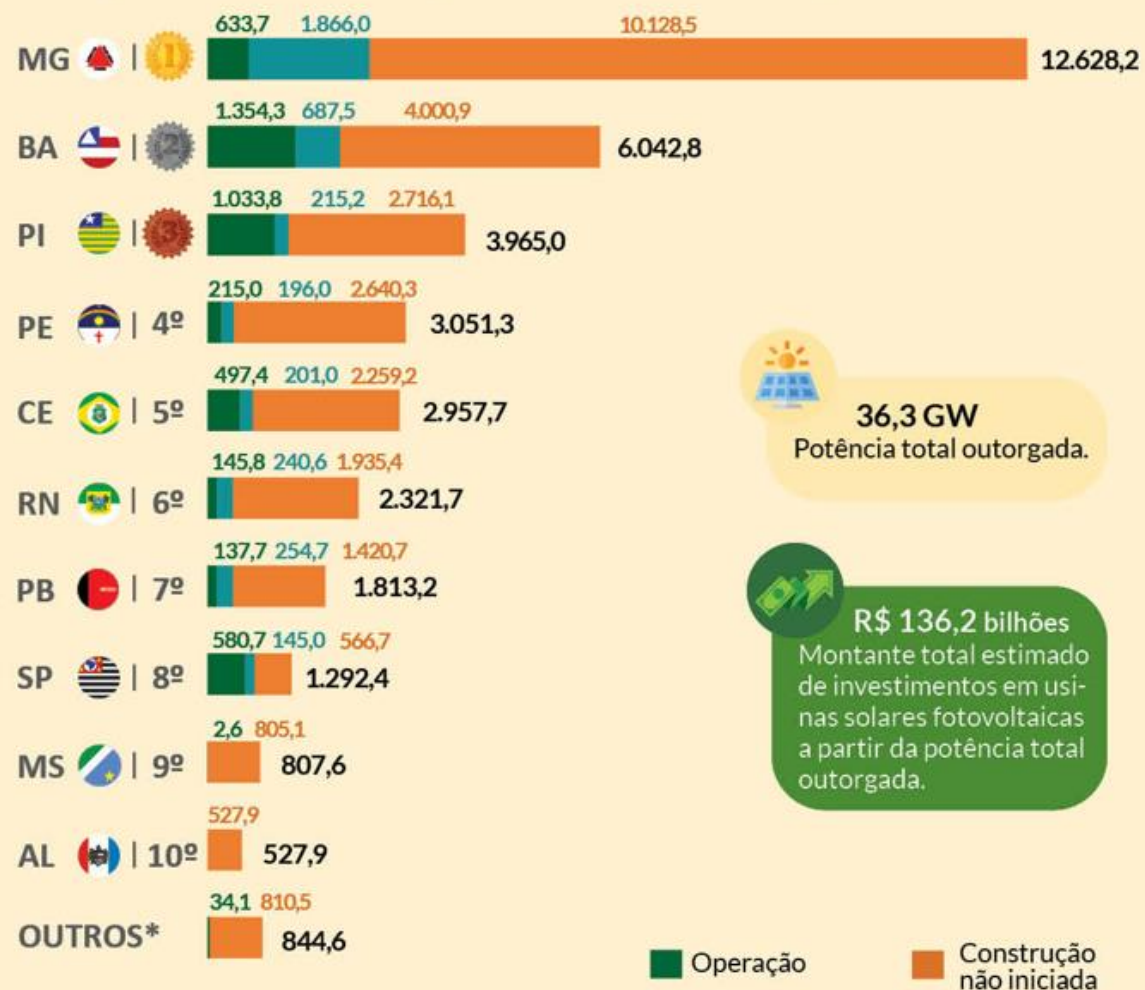
Fonte: CCEE/ABSOLAR, 2022.



# Geração Centralizada

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.

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



\*Usinas espalhadas em 12 estados brasileiros


## GERAÇÃO CENTRALIZADA



## Matriz Elétrica Brasileira

SCG - Superintendência de Concessões e Autorizações de Geração

Data de referência dos dados: 11/3/2022 13:00



Início

Matriz Elétrica Brasileira

Matriz por fase de construção

Matriz por Origem de Combustível

Matriz por Fonte e Combustível Final

Matriz Renováveis / Não Renováveis

Tipo

CGH CGU EOL PCH **UFV** UHE UTE UTN

UF

AC BA MA PA PR RO SE  
AL CE MG PB RJ RS SP  
AM ES MS PE RN SC TO  
AP GO MT PI

Fase

Construção não iniciada

Construção

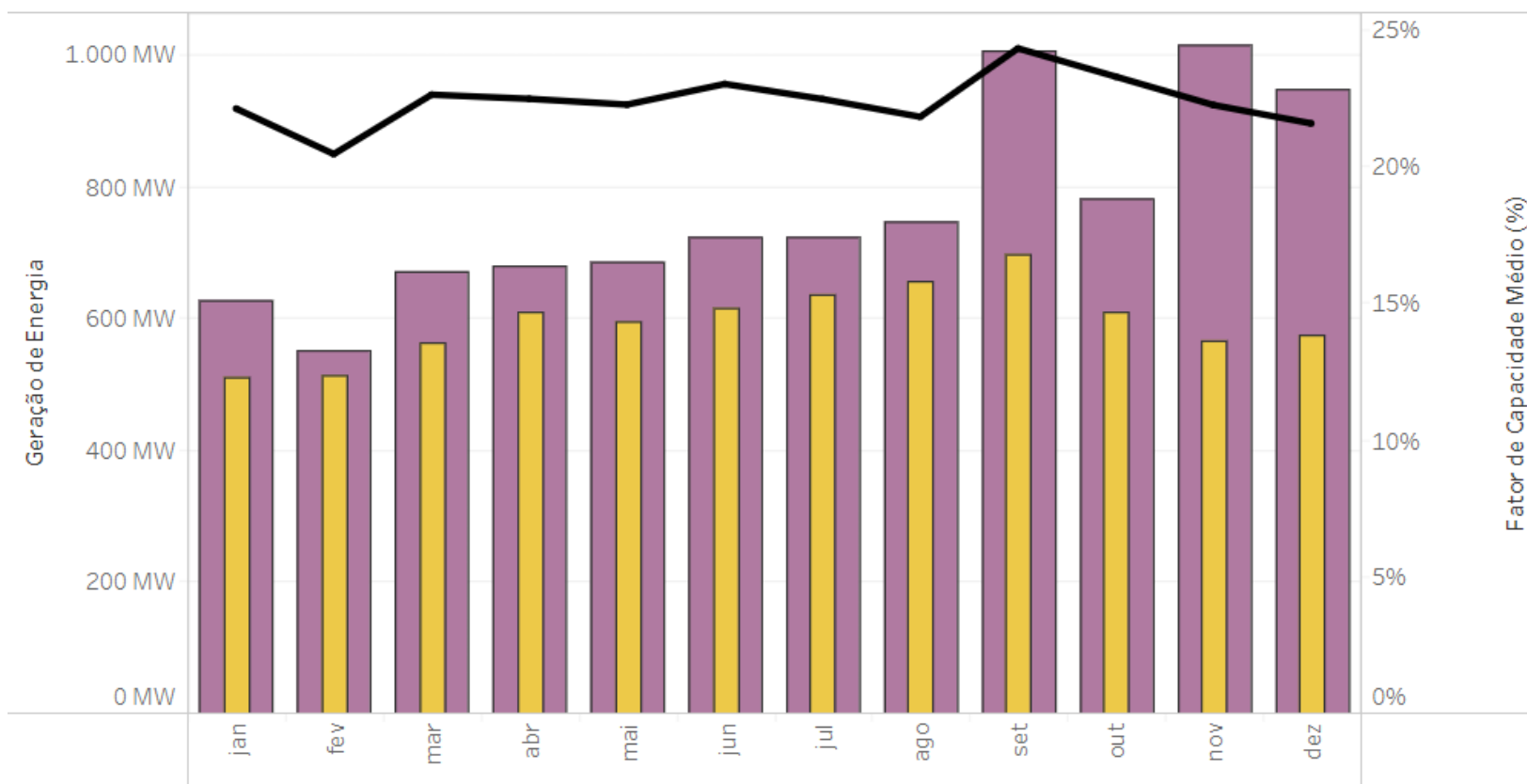
Operação

● UFV

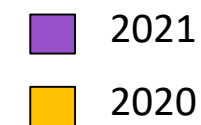
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	% (Pot. Fiscalizada)
UFV	8274	40.880.675,88	4.741.385,78	100,00%
<b>Total</b>	<b>8274</b>	<b>40.880.675,88</b>	<b>4.741.385,78</b>	<b>100,00%</b>



## Geração Solar e Fator de Capacidade Mensal (MWmed)



$$CF = \frac{\int_0^{8760h} P(t) dt}{P_{nom} \times 8760h}$$



# Fabricação de componentes do sistema fotovoltaico

## Impacto da valorização do polissilício no preço do módulo FV

### Evolução do Preço do Polissilício



- Dificuldades enfrentadas pelos fabricantes de polissilício devido às restrições de produção na China geram desequilíbrio entre oferta e demanda por módulos, elevando o preço do polissilício.
- **Aumento superior a 200%** no custo do polissilício em 2021.
- A variação de preço deste insumo **impacta diretamente o preço dos módulos FV.**

**Greener**



# Módulos fotovoltaicos

## Evolução do Preço FOB

### Evolução do Preço do Módulo FV



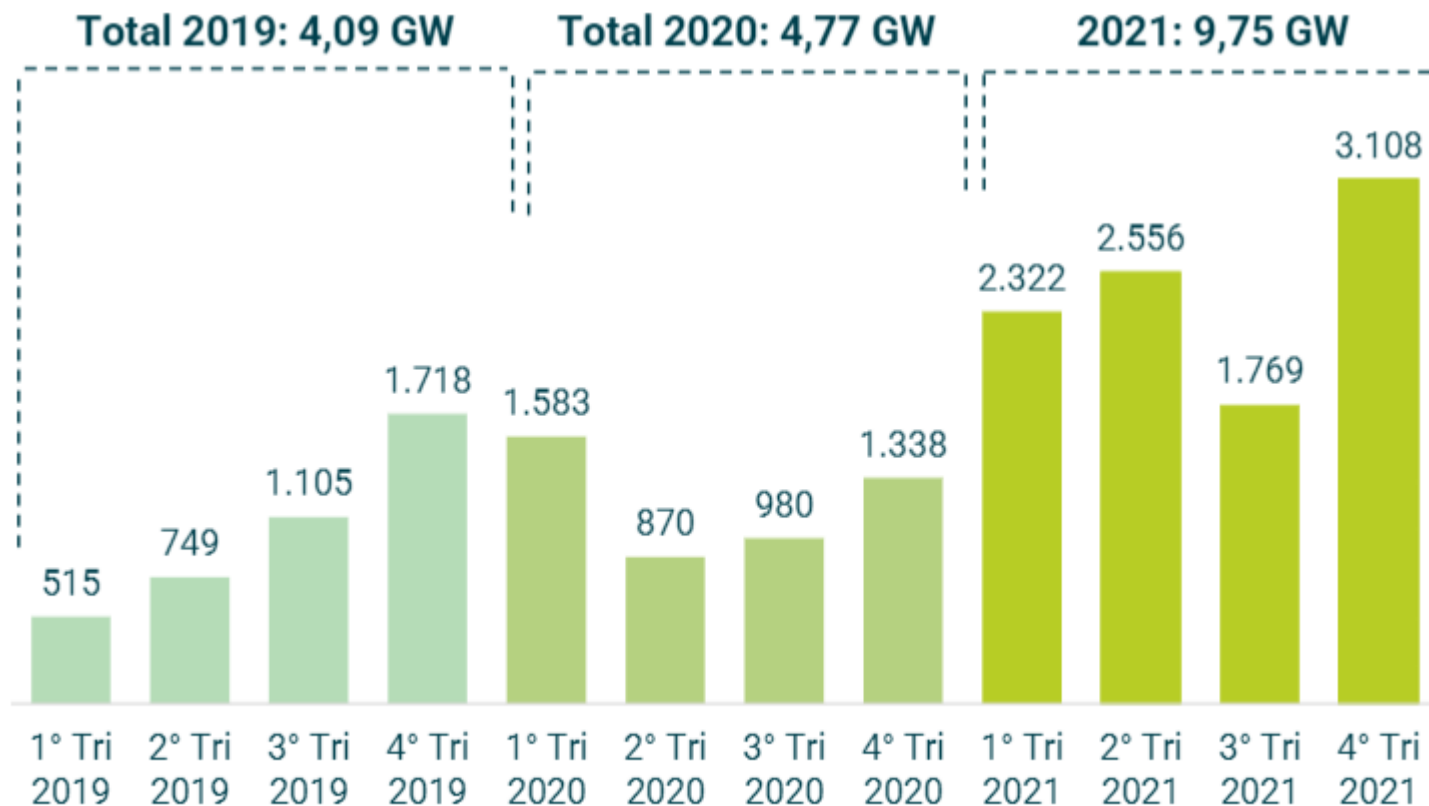
- **Aumento médio de 26%** no preço FOB do módulo Mono PERC. O preço do módulo fotovoltaico vem apresentando aumento especialmente em **função do preço de polissilício**, sua principal matéria-prima.
- O **Frete Internacional** foi um fator que contribuiu fortemente para elevação dos custos do produto do Brasil. A Aplicação de **EX Tarifário** (isenção de imposto de importação) foi um forte elemento para atenuar os custos do módulo FV no mercado brasileiro.

**Greener**

Fonte: GREENER - Estudo Estratégico Geração Distribuída - Mercado Fotovoltaico, 2º. Semestre 2021

## Módulos fotovoltaicos – Volume importado [MWp]

Geração Distribuída e Geração Centralizada



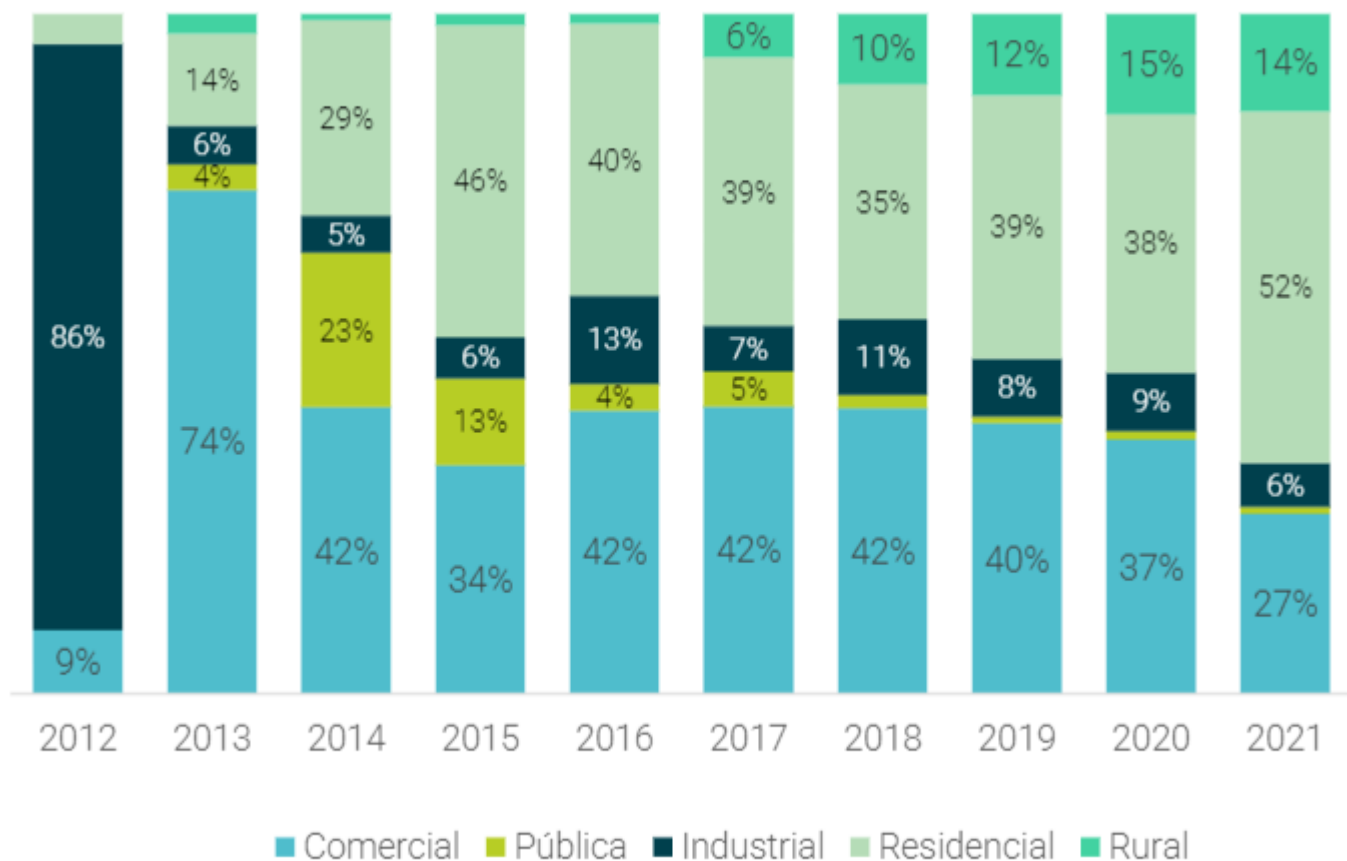
➤ Volume de módulos de **2021 superou em 104%** o volume de 2020.

**Greener**

Fonte: Receita Federal, 2021 e Greener

Fonte: GREENER - Estudo Estratégico Geração Distribuída - Mercado Fotovoltaico, 2º. Semestre 2021

## Volume adicionado por classe de consumo



- A classe **residencial** ampliou sua participação no volume de sistemas FV adicionados em 2021, representando **52% do total**. A classe **comercial** continuou apresentando queda.
- A tarifa elevada e o trabalho remoto contribuíram para maior adoção de GD nas residências, aliados à queda nas atividades comerciais no período de pandemia.

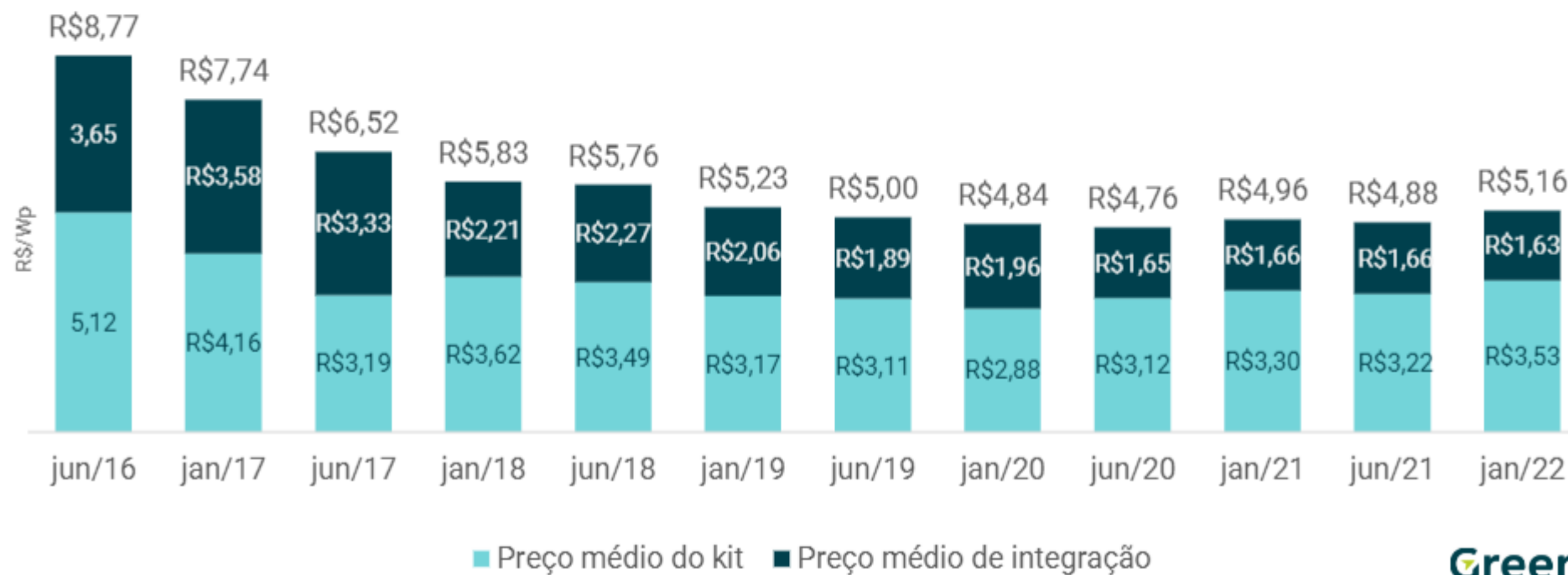
Fonte: Aneel, 2021 (relatório extraído em 01/02/2022).

**Greener**

# Evolução dos preços de sistemas FV

## Sistema residencial (4 kWp)

- Apesar da elevação dos preços em 2021, o sistema FV residencial acumula uma **redução de 33% nos últimos 5 anos**.



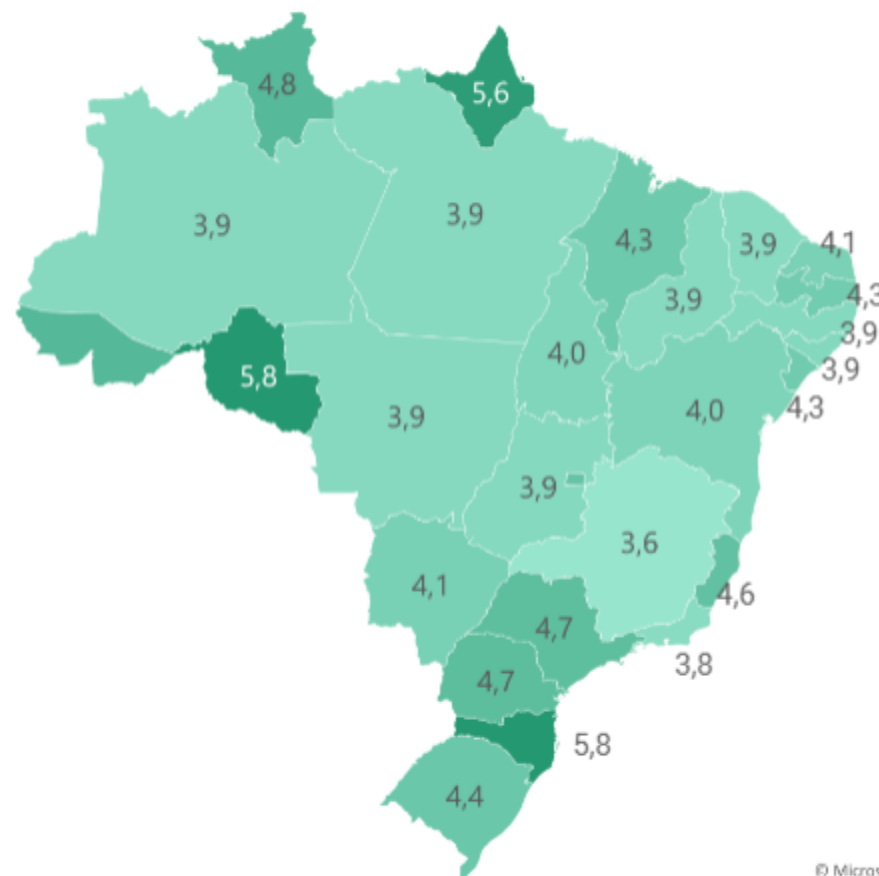
**Greener**

Fonte: GREENER - Estudo Estratégico Geração Distribuída - Mercado Fotovoltaico, 2º. Semestre 2021

# Payback médio por Estado

## Residencial (em anos)

- O valor dos sistemas residenciais foi de **R\$ 5,16/Wp** (dados médios conforme pesquisa GD 2º sem. 2021 para sistemas de **4 kWp**). O cálculo leva em consideração a produtividade do local, o custo médio dos sistemas, a tarifa das concessionárias, um PR\* de **75%** e índice de simultaneidade de **30%**.

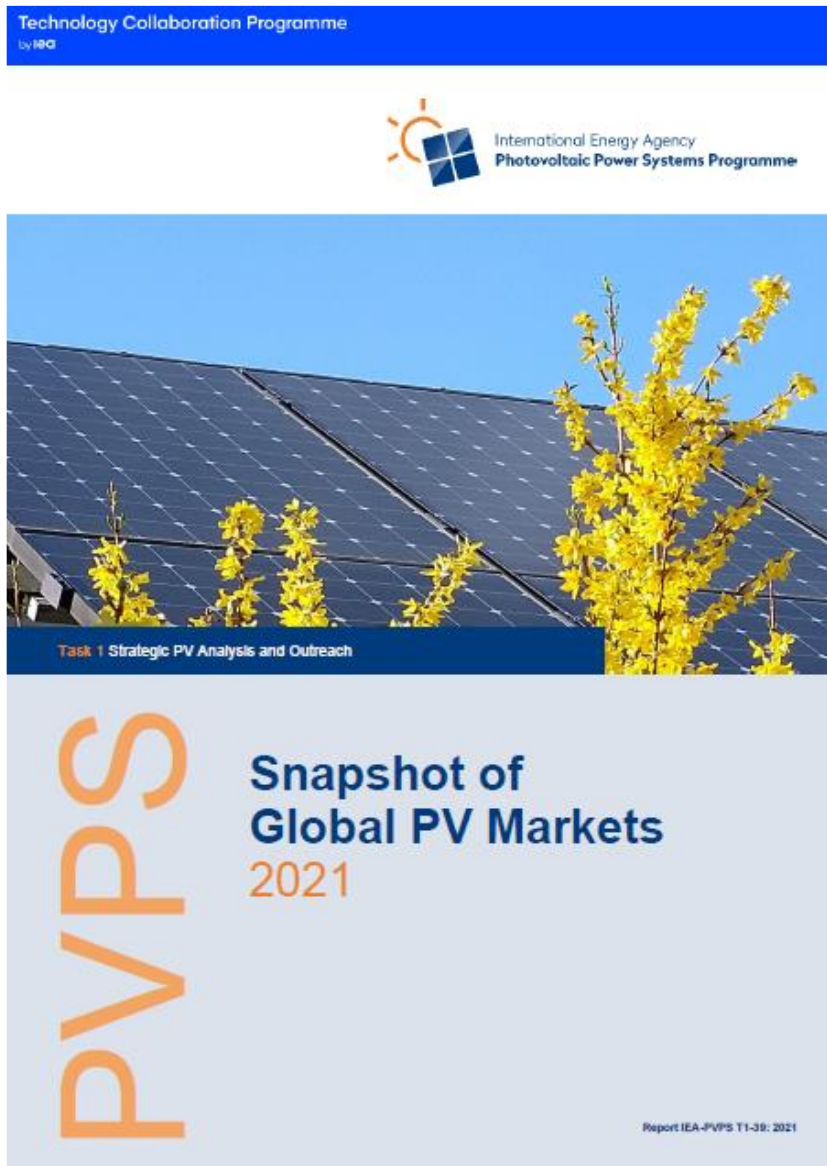


Powered by Bing  
© Microsoft, OpenStreetMap

**Greener**

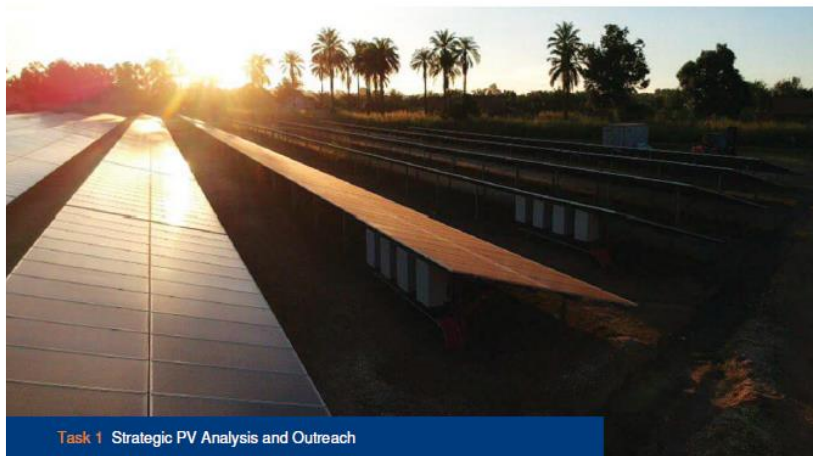
\*PR = Performance Ratio

Fonte: GREENER - Estudo Estratégico Geração Distribuída - Mercado Fotovoltaico, 2º. Semestre 2021



[https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA\\_PVPS\\_Snapshot\\_2021-V3.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/04/IEA_PVPS_Snapshot_2021-V3.pdf)

Technology Collaboration Programme  
by IEA



Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach

PVPS

# Trends in Photovoltaic Applications 2021

Report IEA-PVPS T1-41:2021

[https://iea-pvps.org/trends\\_reports/trends-in-pv-applications-2021/](https://iea-pvps.org/trends_reports/trends-in-pv-applications-2021/)

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

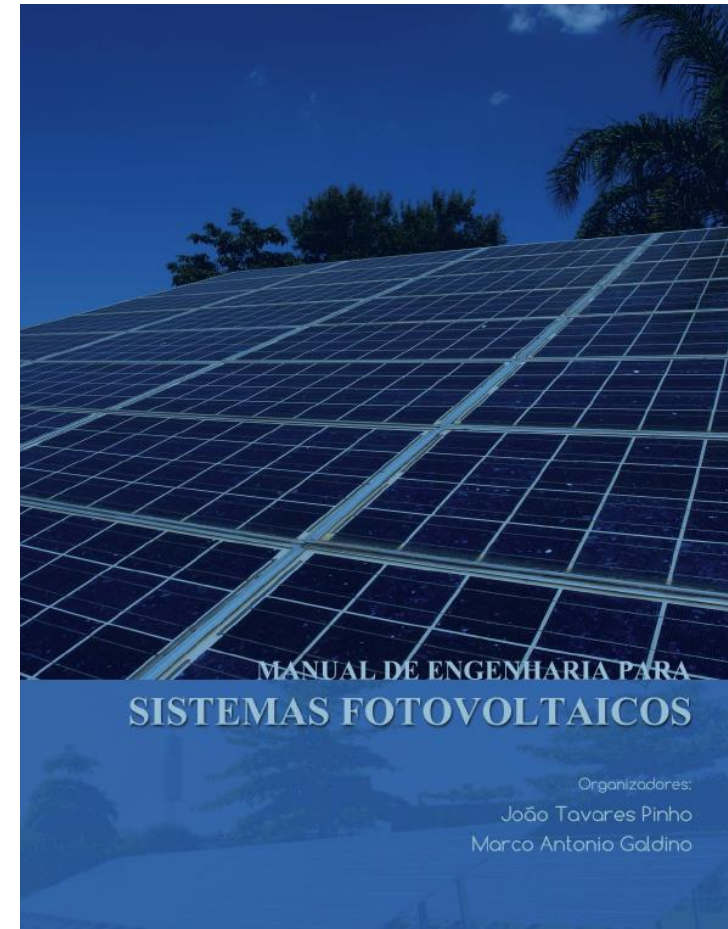
1.1 – Energia solar térmica

1.2 – Energia solar fotovoltaica

1.2.1 – História e situação atual da energia solar fotovoltaica no mundo

1.2.2 – Breve histórico da energia solar fotovoltaica no Brasil

1.3 – Referências



[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual de Engenharia FV 2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)