



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

ENERGIA SOLAR

Roberto Zilles
zilles@iee.usp.br

Recurso solar

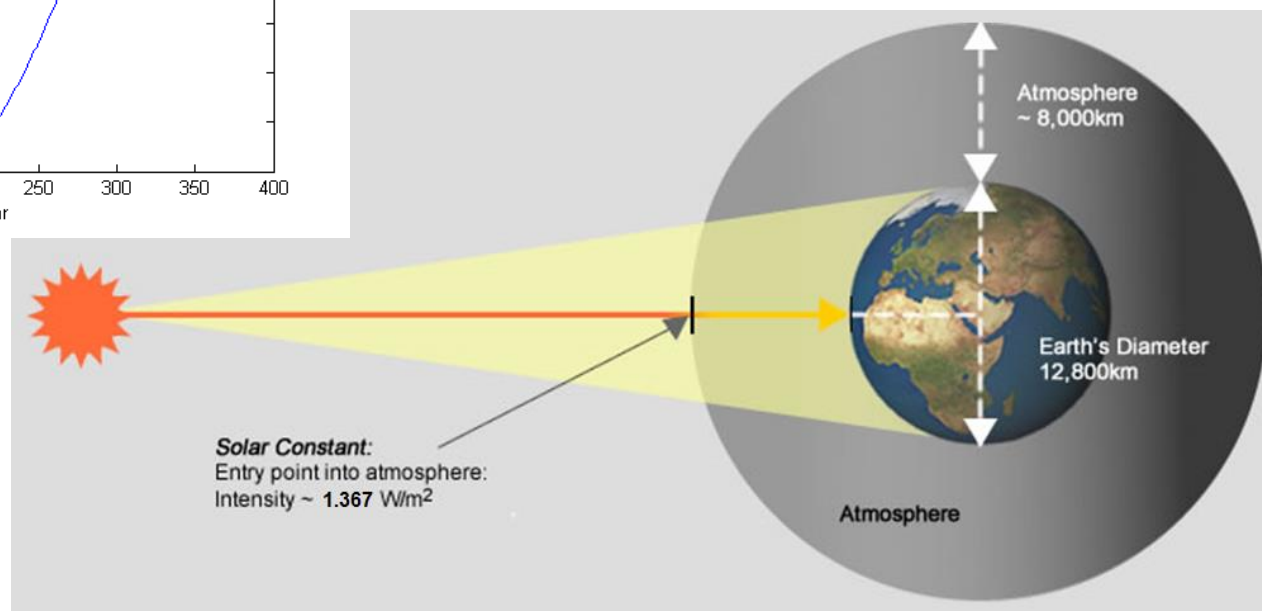
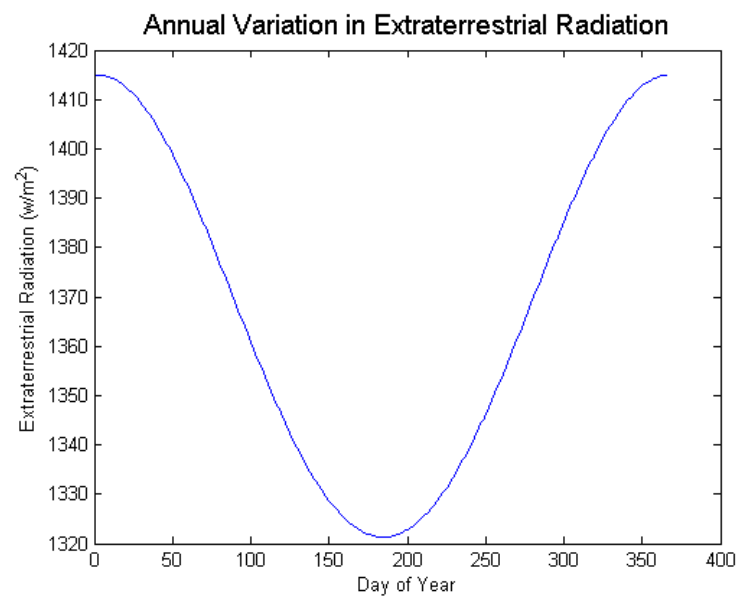
Dispositivos de conversão da radiação solar

Particularidades da geração de eletricidade com sistemas fotovoltaicos

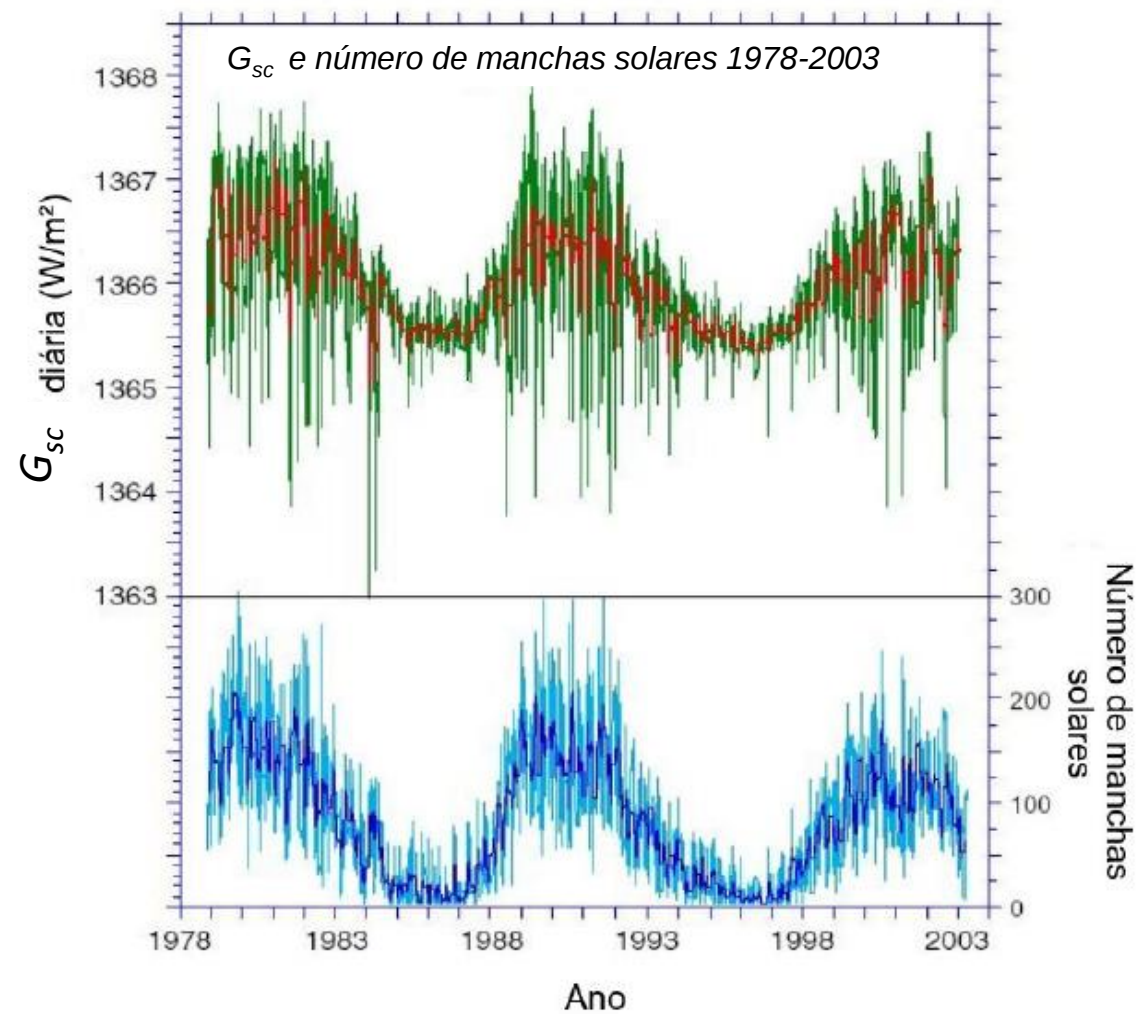
Cenário nacional

Marco legal da Geração Distribuída

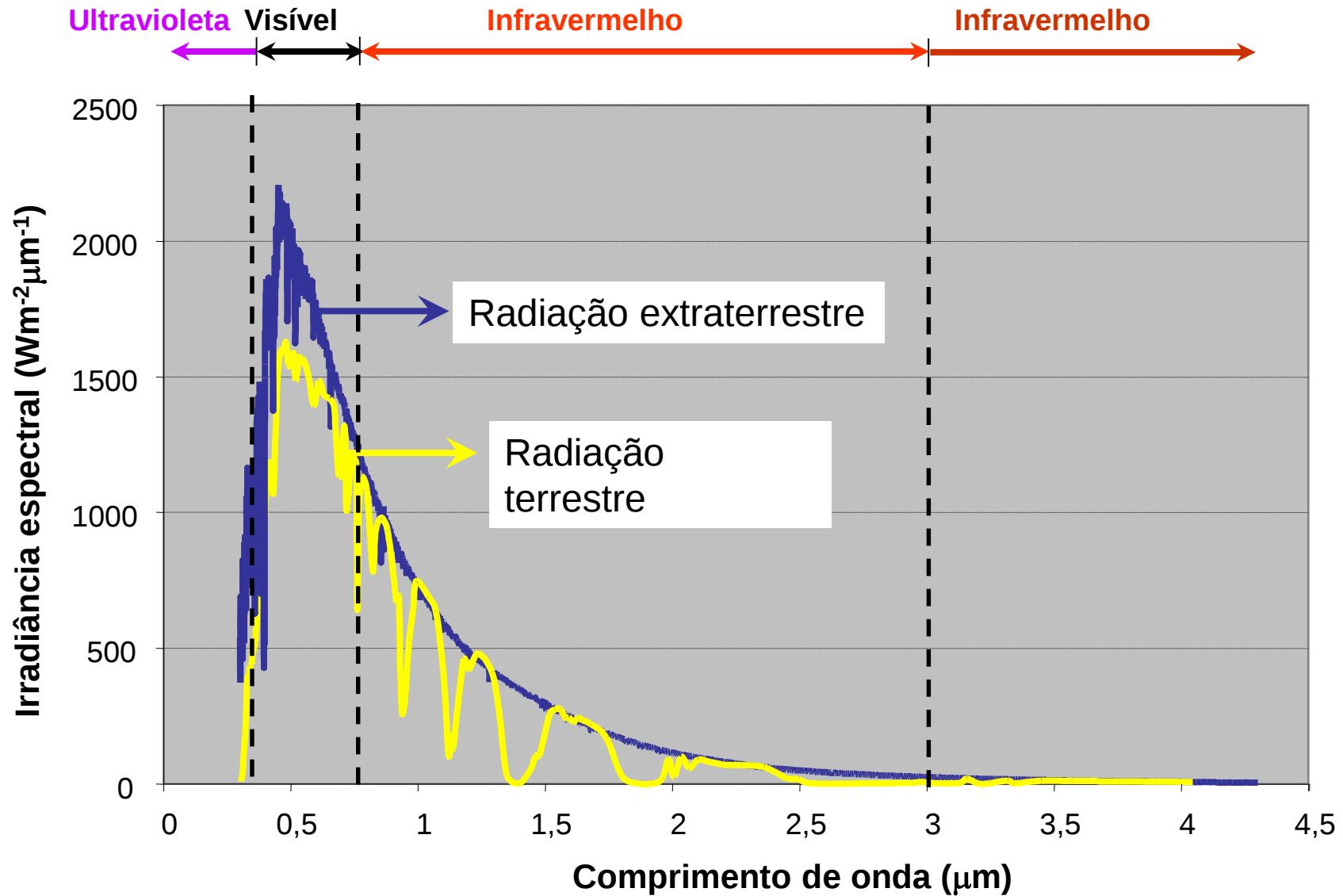
- ✓ Constante Solar (fluxo médio de radiação): $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$



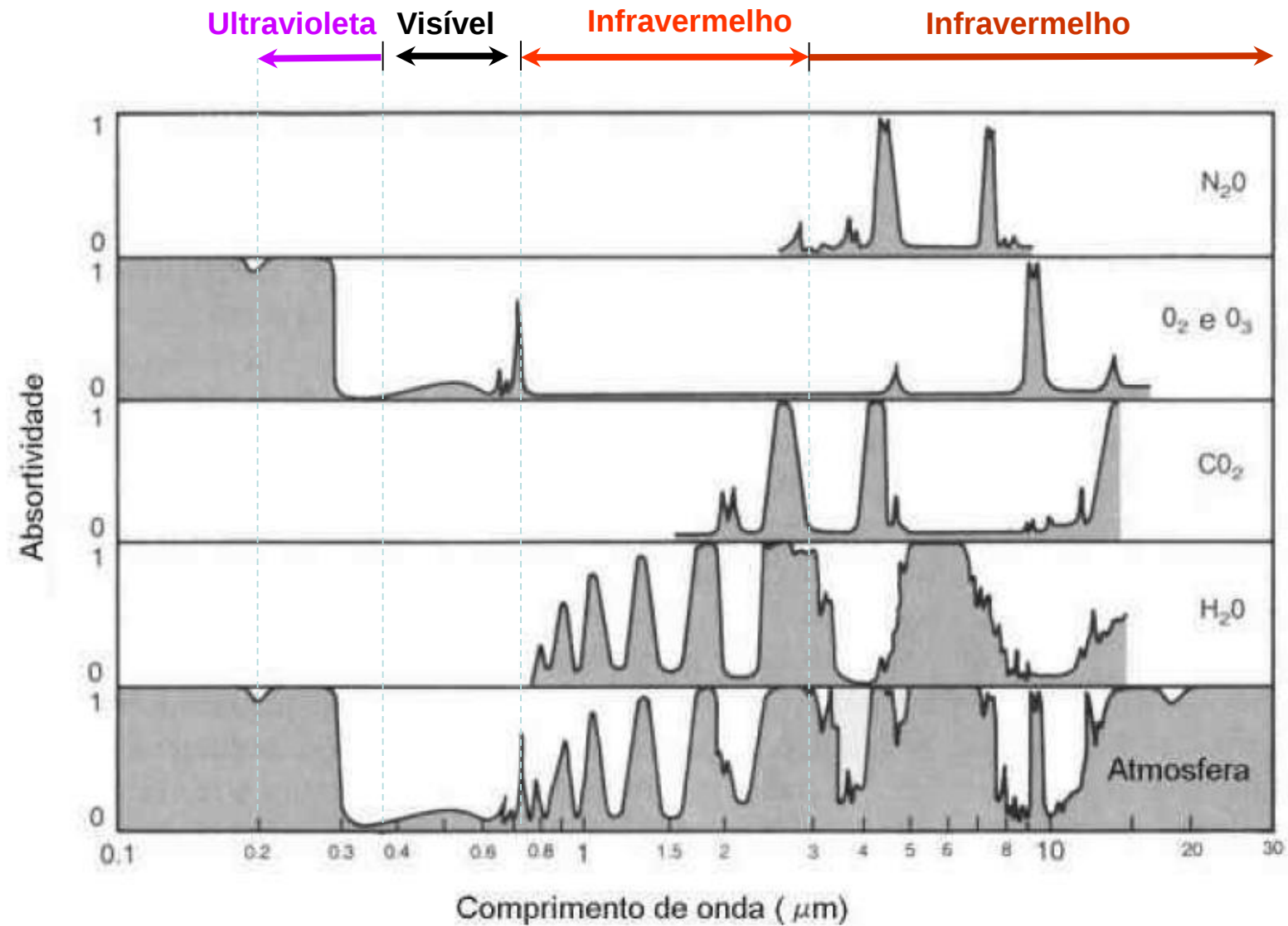
- ✓ Constante Solar (fluxo médio de radiação): $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$



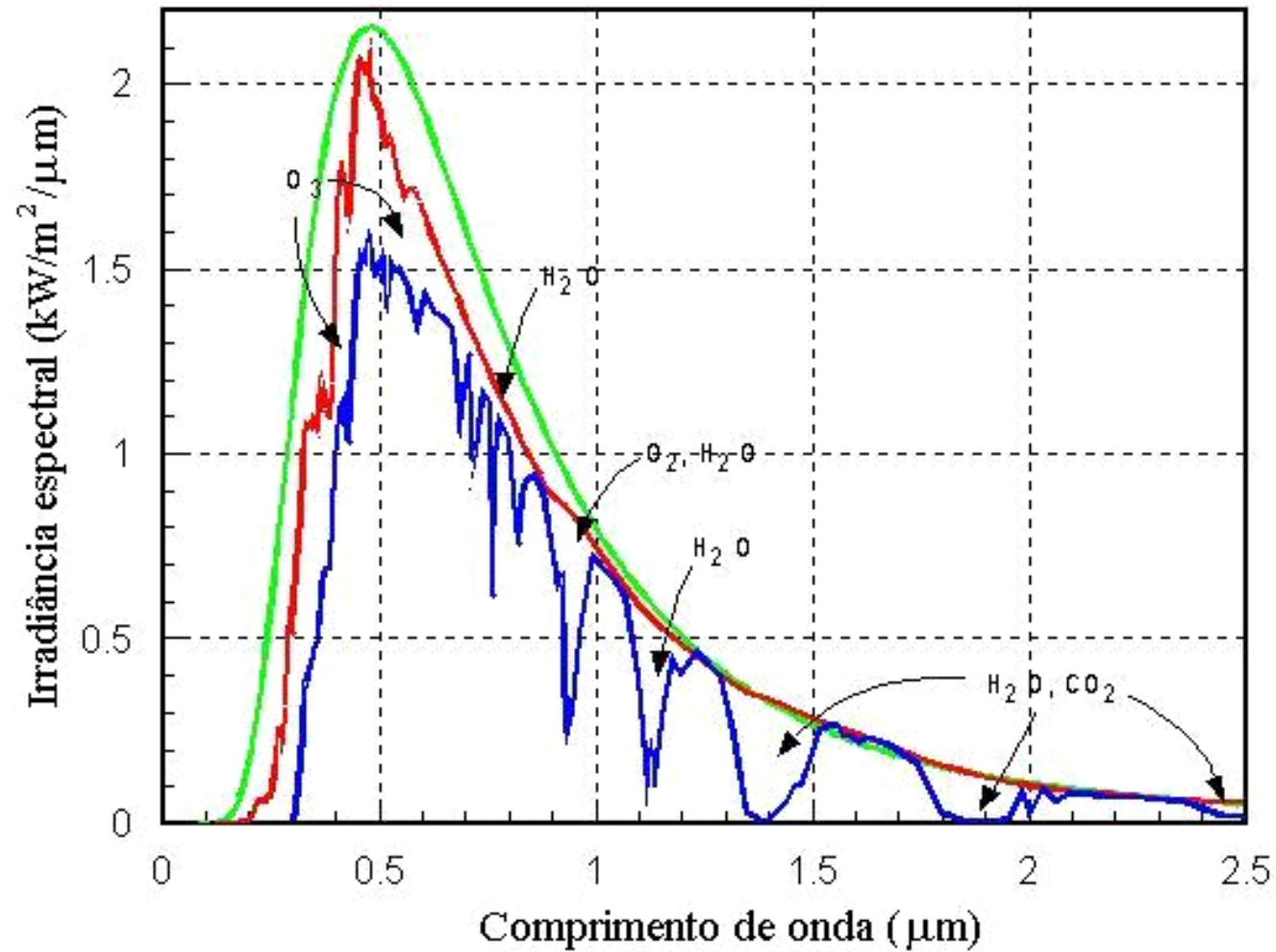
Distribuição espectral da radiação solar (I)



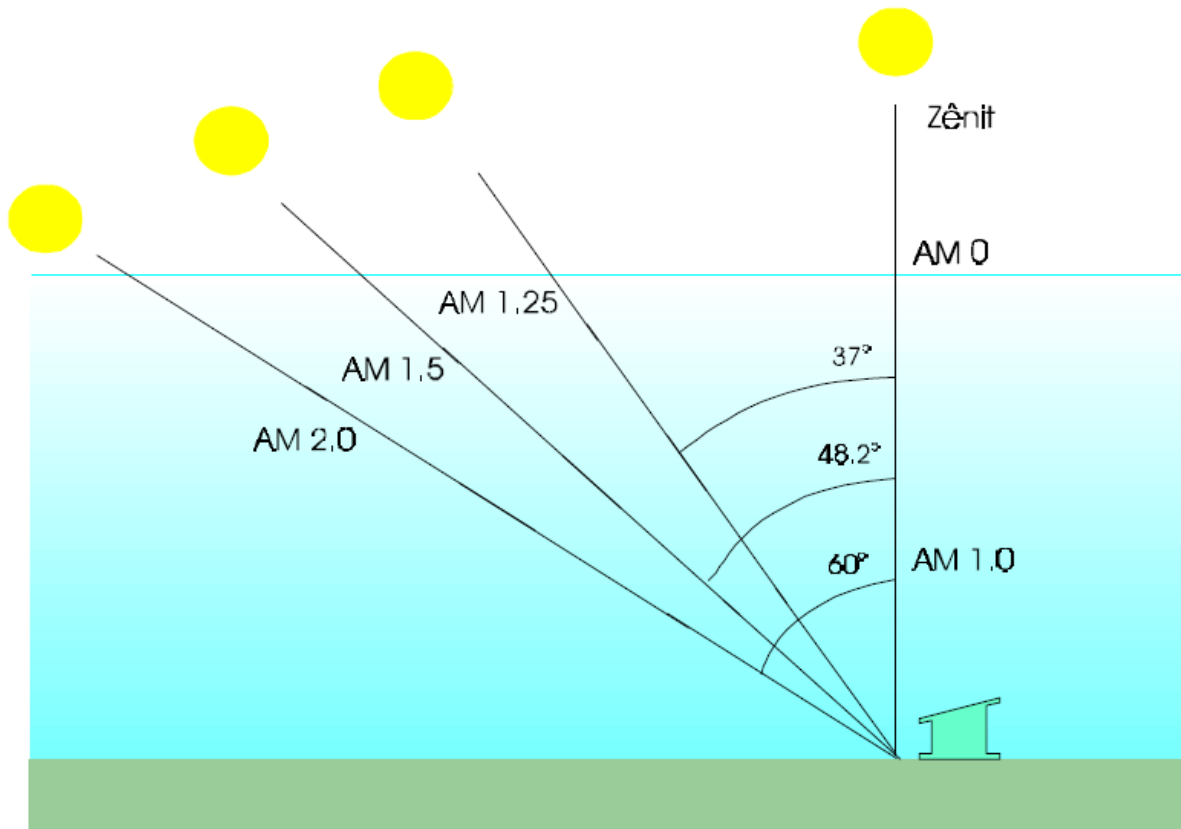
Absortividade da Atmosfera



Irradiância Espectral da Radiação Solar

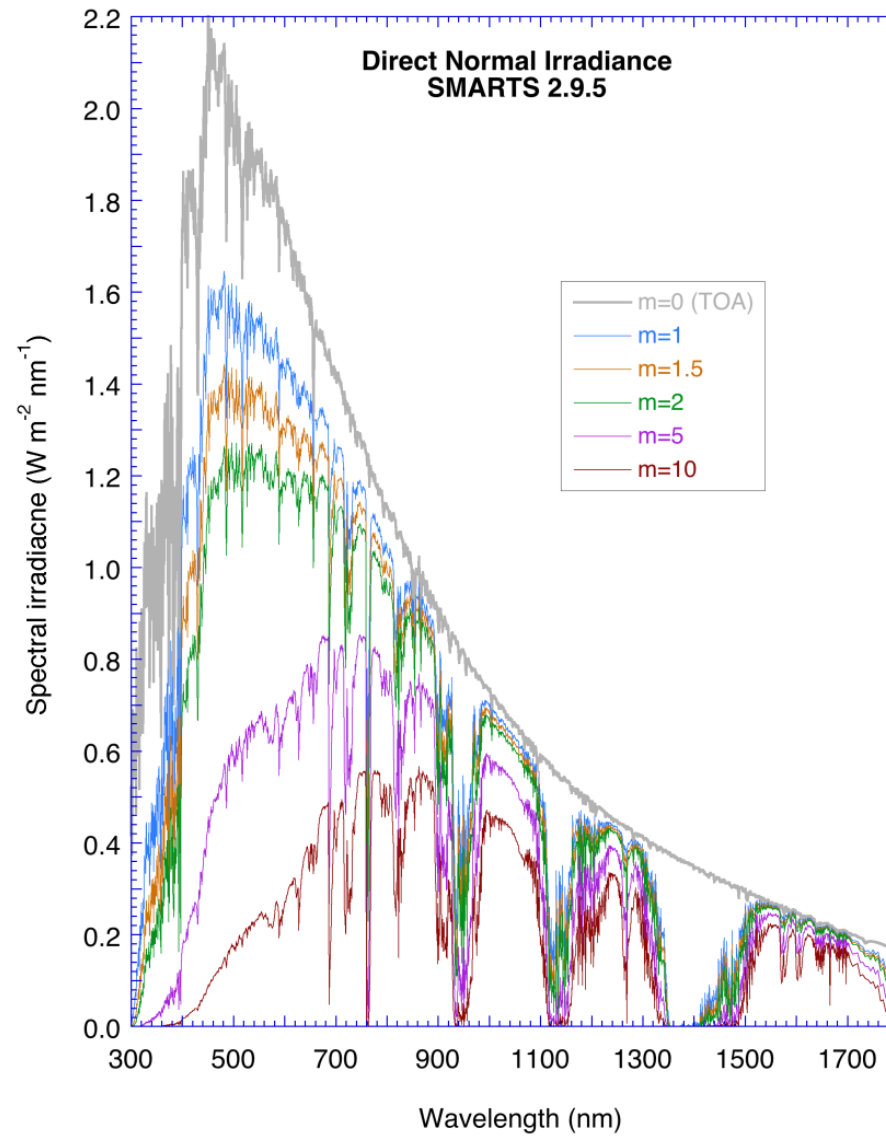


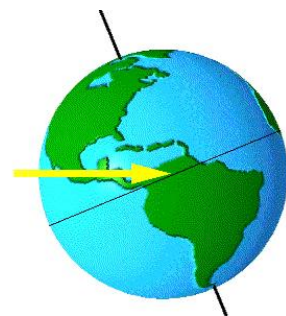
Massa de Ar



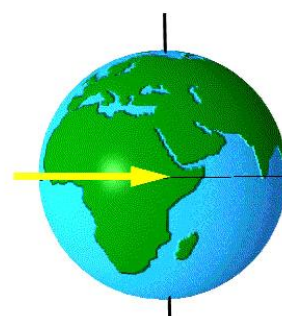
$$AM = \frac{1}{\cos(\theta_z)}$$

Atenuação Provocada pela Massa de Ar

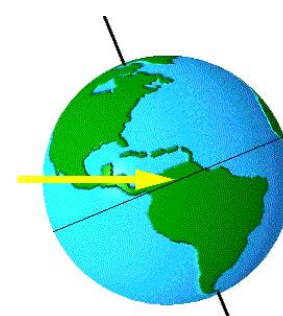




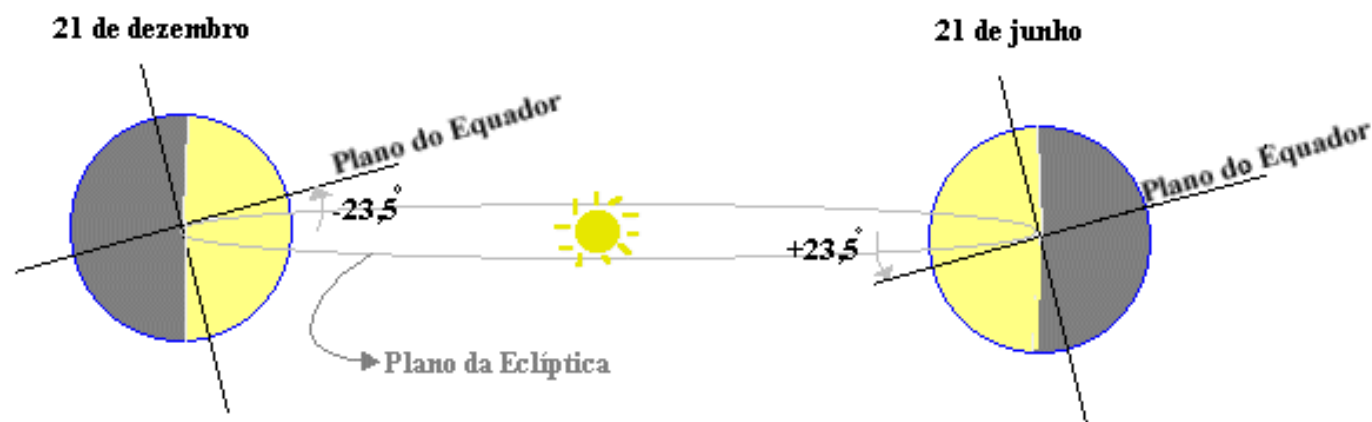
Verão*



Primavera/Outono*



Inverno*



$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (d_n + 284) \right], \text{ em graus}$$

DEFINIÇÕES

Radiação Solar – diz do fenômeno físico, o transporte de calor e energia na forma de ondas eletromagnéticas.

Irradiância – diz-se da grandeza física, a potência da energia radiante ou fluxo de energia que atravessa uma determinada área em um certo período de tempo. É medida em W/m^2 .

Irradiação – diz-se da grandeza física, a quantidade de energia radiante que atravessa uma determinada superfície. É numericamente igual à integração da irradiância no intervalo de tempo em questão. É medida em Wh/m^2 .

Insolação –também chamada de “horas de sol”, a insolação é período de tempo durante o qual o feixe de radiação solar direto ilumina uma superfície. Pode ser obtida experimentalmente registrando-se o número de horas do dia no qual a irradiância permaneceu acima de um valor definido, usualmente, 120 W/m^2

Perfis diários de irradiância

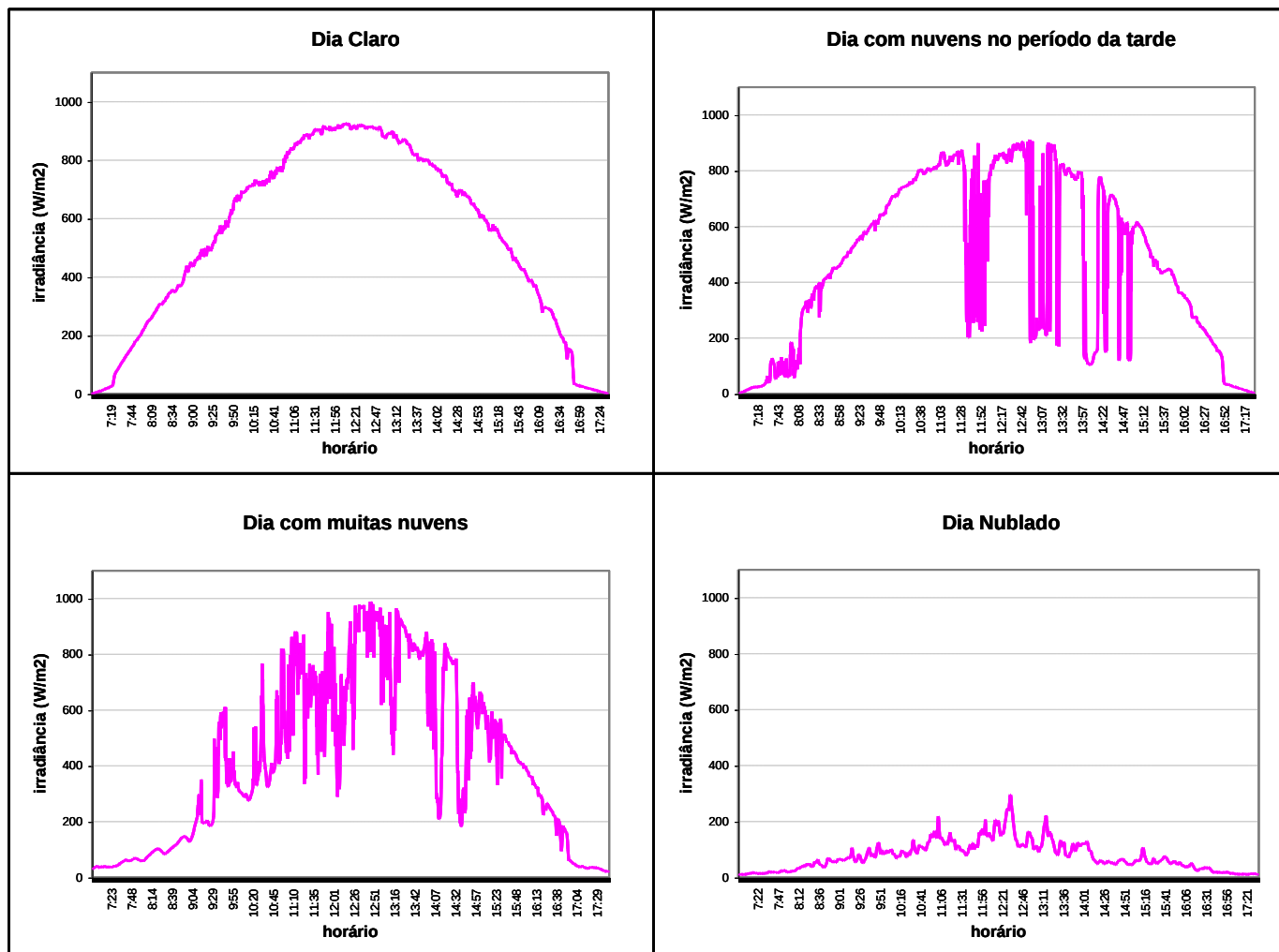
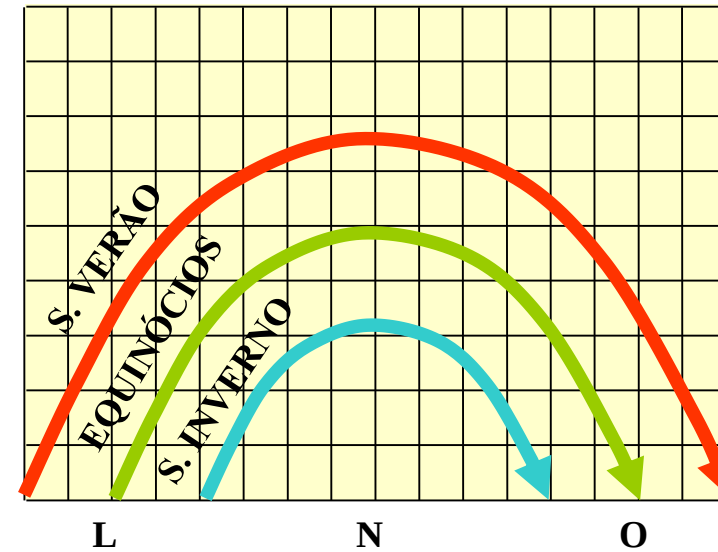
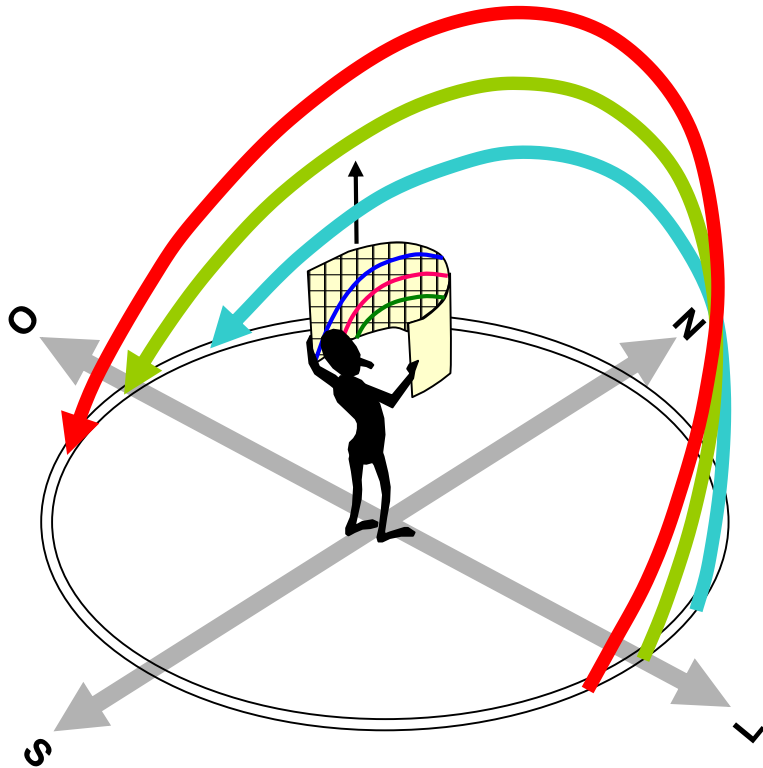


Diagrama de trajetórias do sol

→ Solstício de verão (Dezembro)

→ Equinócios de Primavera e Outono (Setembro/Março)

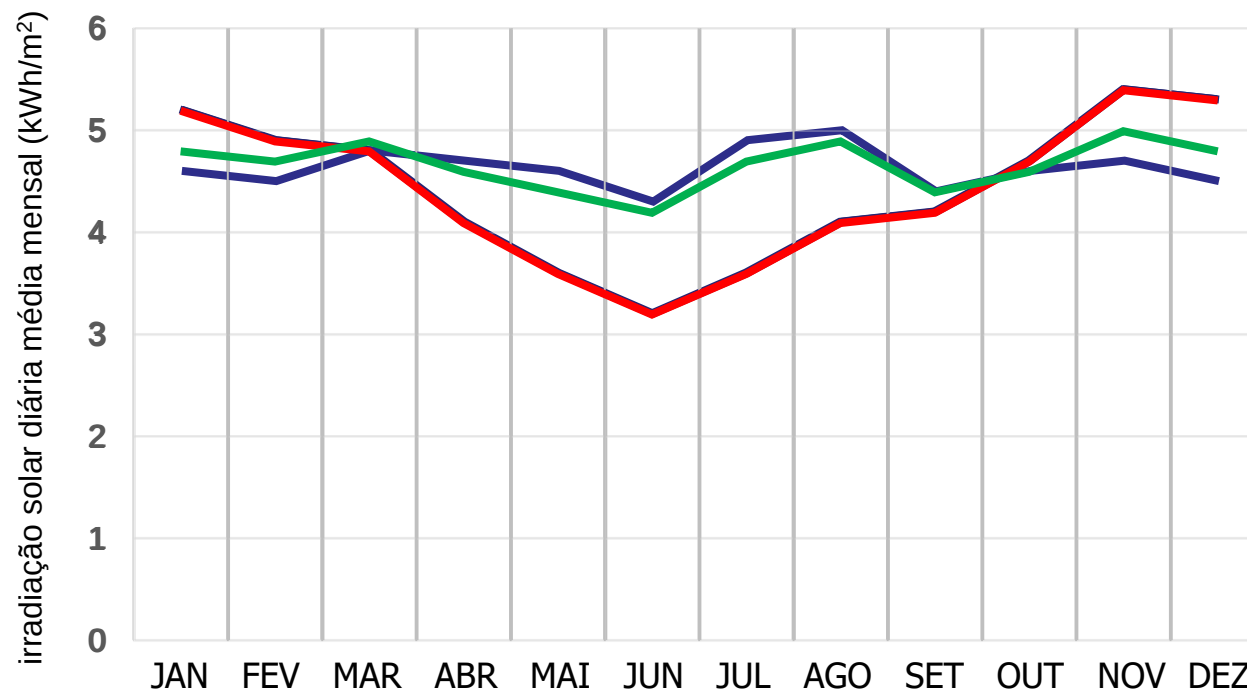
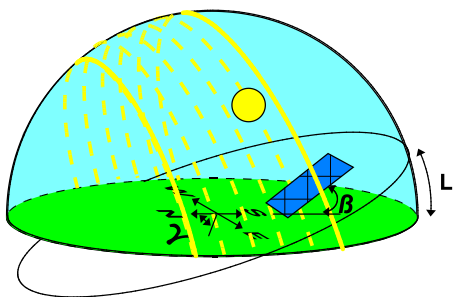
→ Solstício de inverno (Junho)

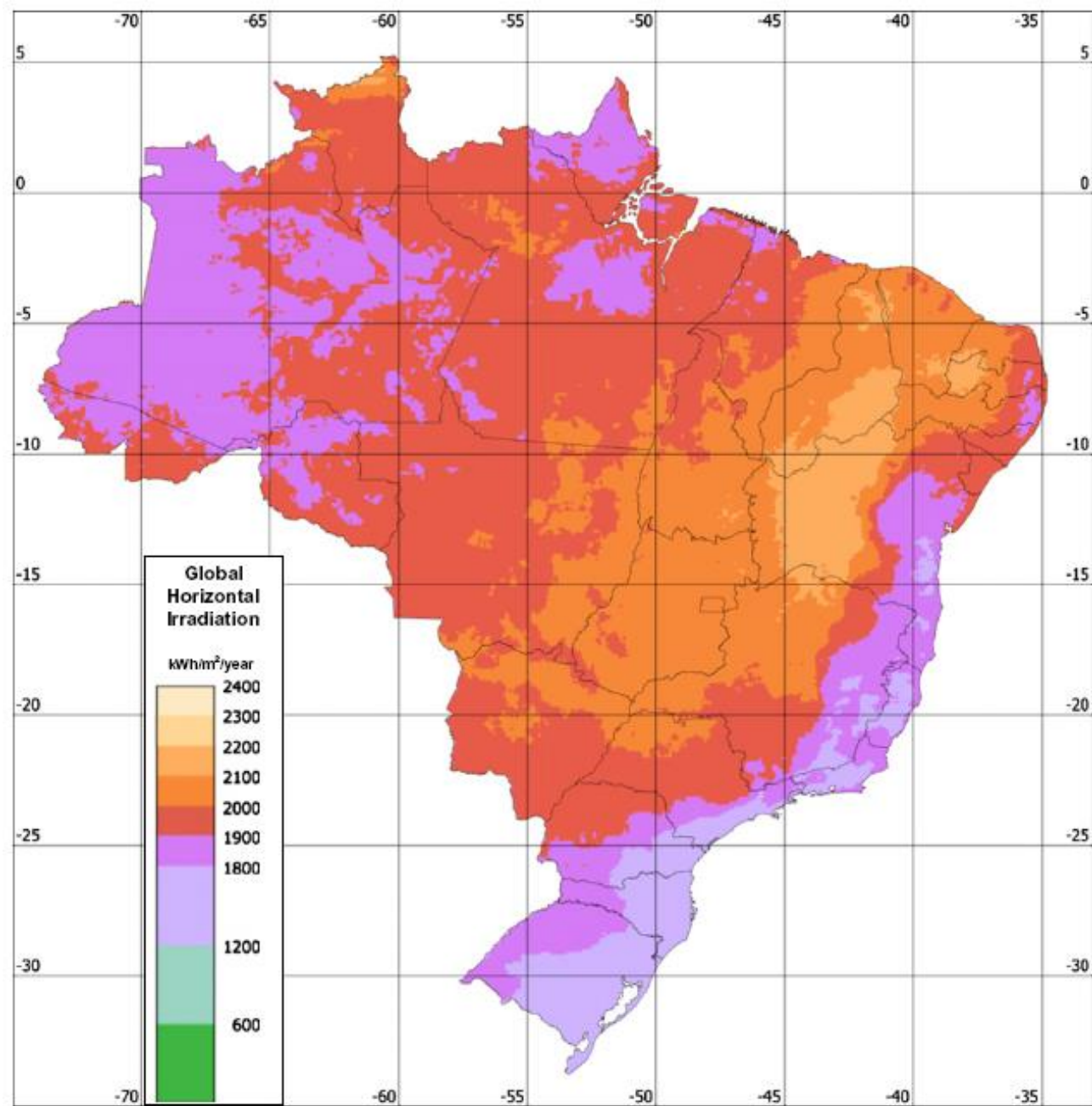


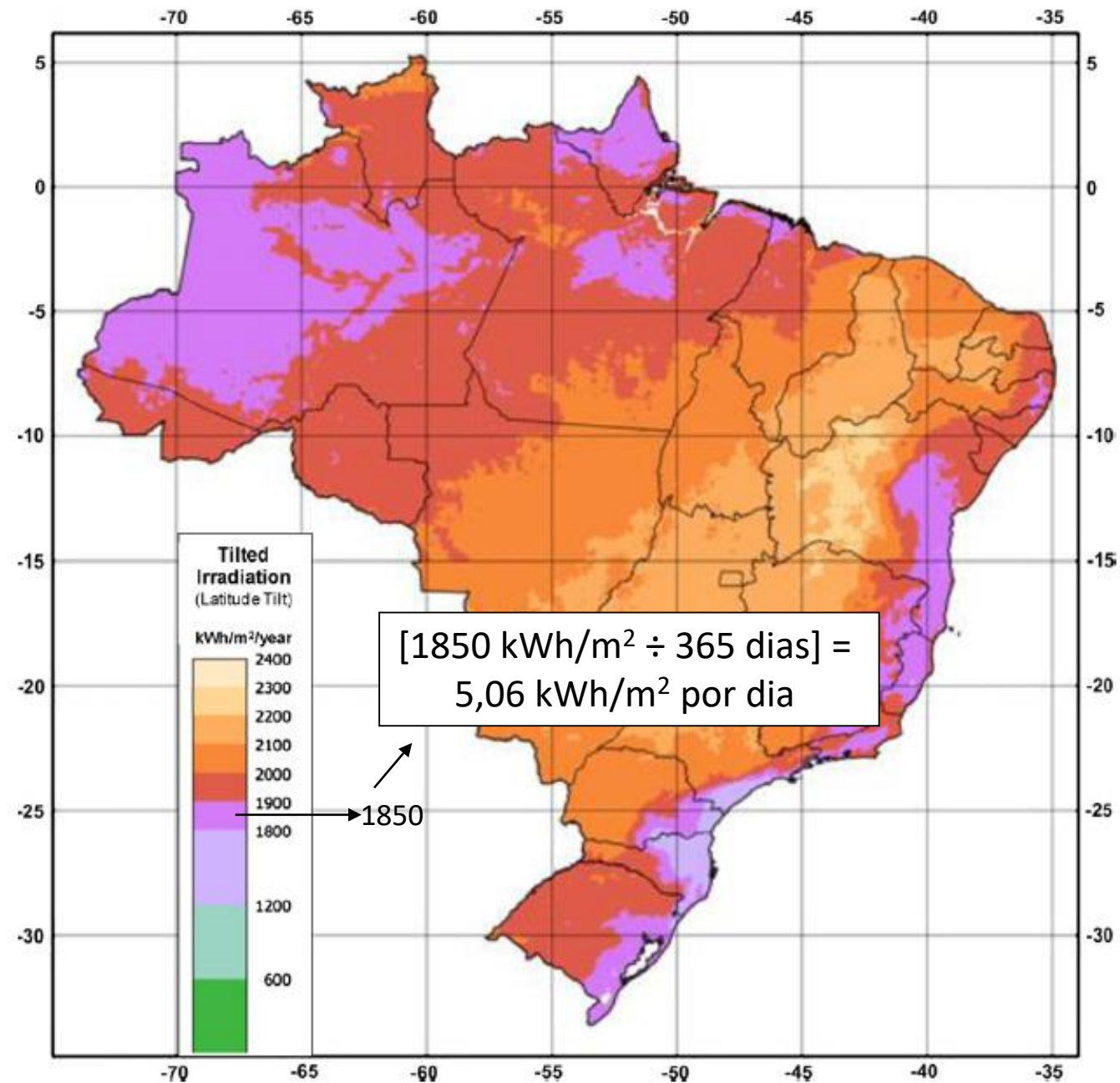
irradiação solar diária média mensal

kWh/m², São José dos Campos

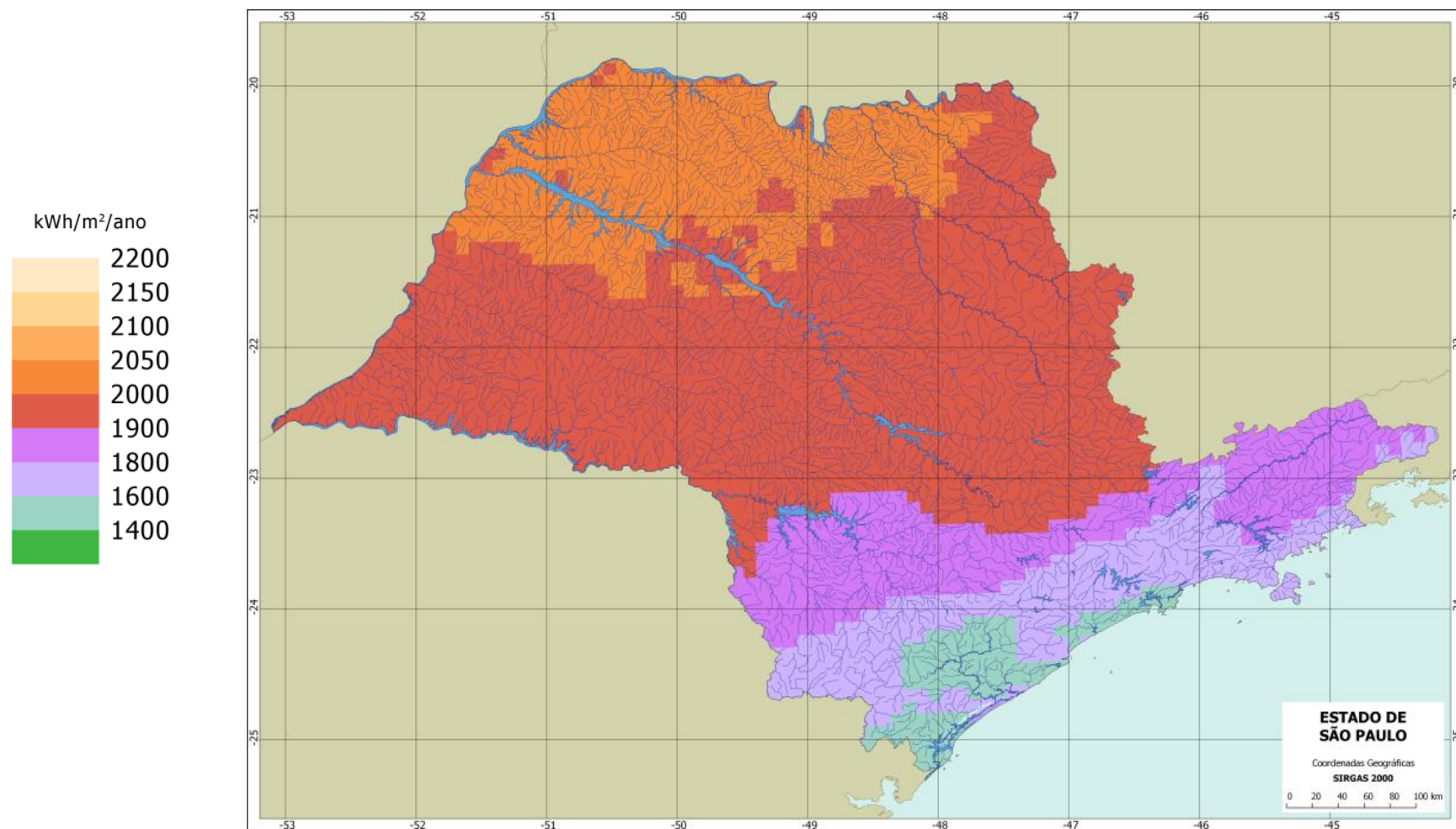
INCLINAÇÃO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
0 GRAUS	5.2	4.9	4.8	4.1	3.6	3.2	3.6	4.1	4.2	4.7	5.4	5.3
23 GRAUS	4.8	4.7	4.9	4.6	4.4	4.2	4.7	4.9	4.4	4.6	5.0	4.8
33 GRAUS	4.6	4.5	4.8	4.7	4.6	4.3	4.9	5.0	4.4	4.6	4.7	4.5



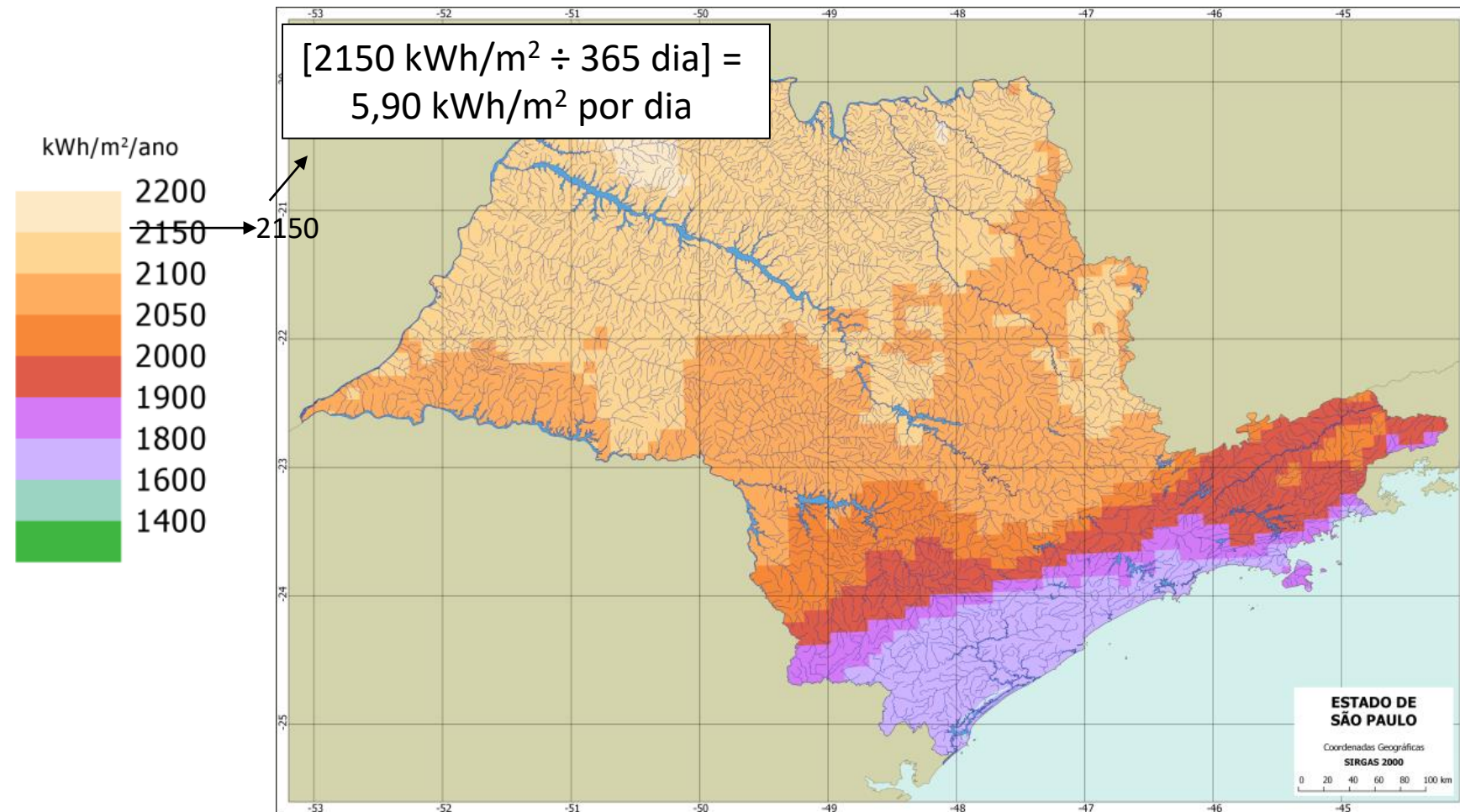


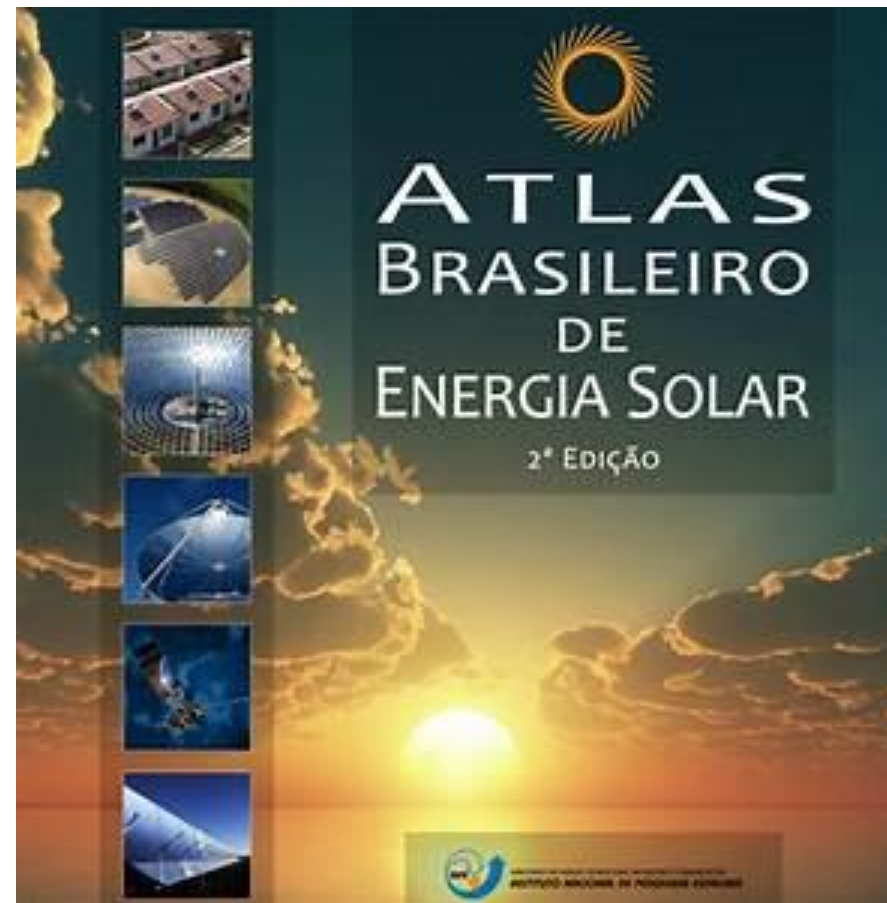


IRRADIAÇÃO GLOBAL (HORIZONTAL) – Total anual



IRRADIAÇÃO TOTAL (INCLINADA) – Total anual



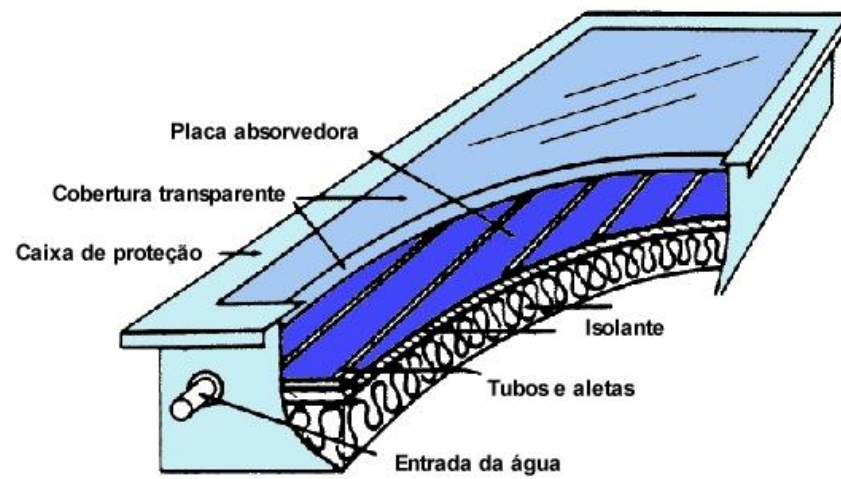


http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf

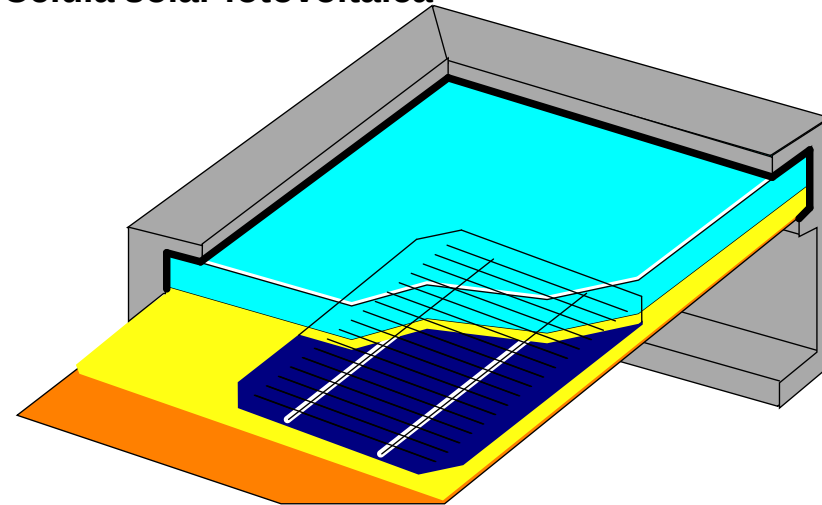
http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html

CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR

Coletor Solar Térmico



Célula solar fotovoltaica



Coletor Solar Plano

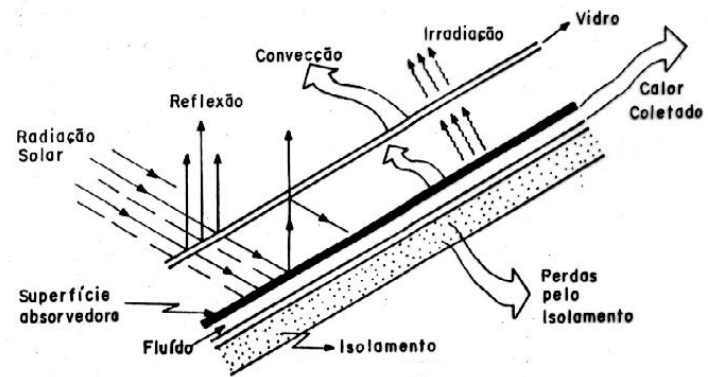


Figura 1 - Esquema de trocas de energia no coletor

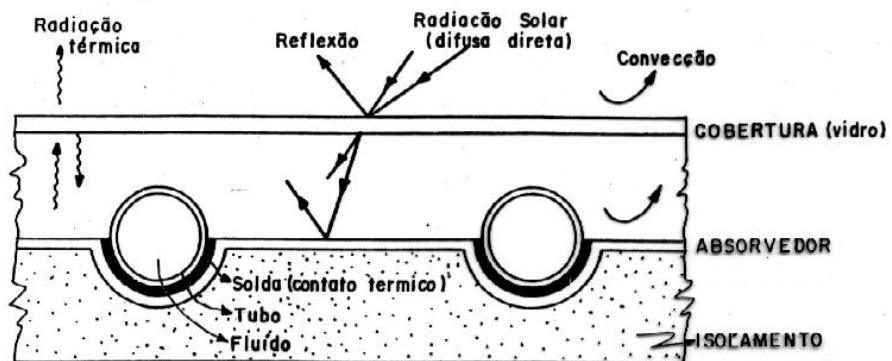
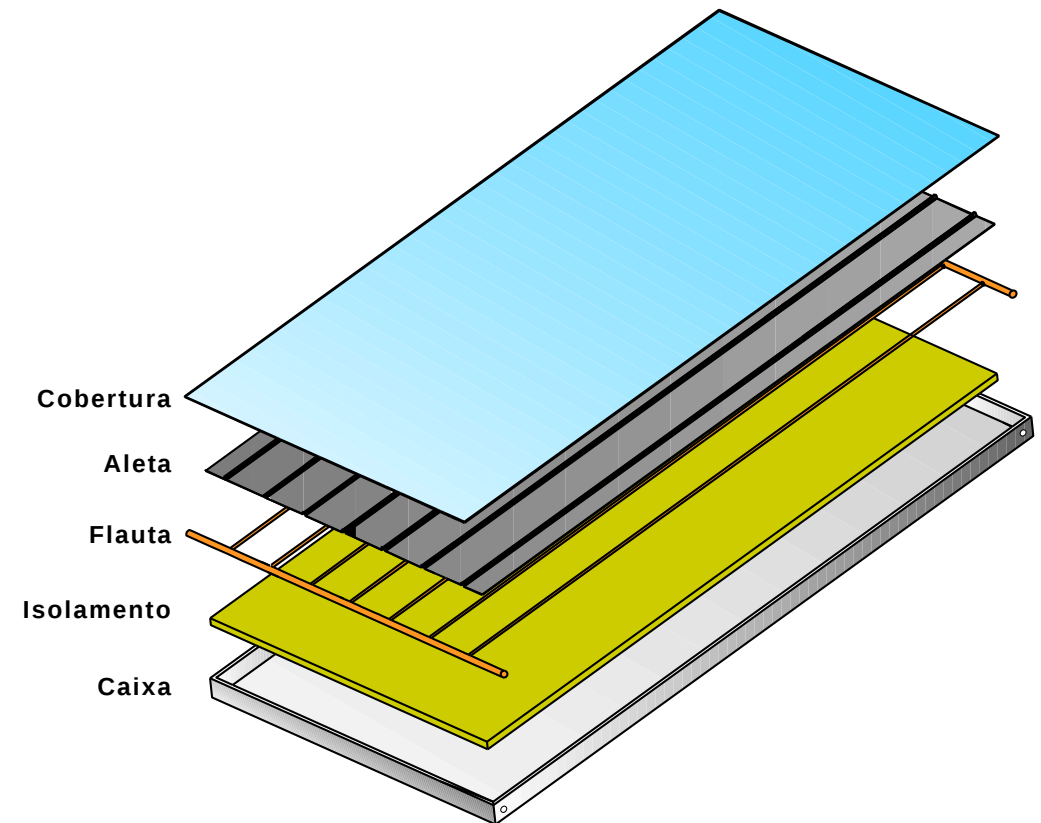


Figura 2 - Corte esquemático de um coletor solar tipo chapa tubos



Coletor Solar Plano



Coletores solares para aquecimento de piscina

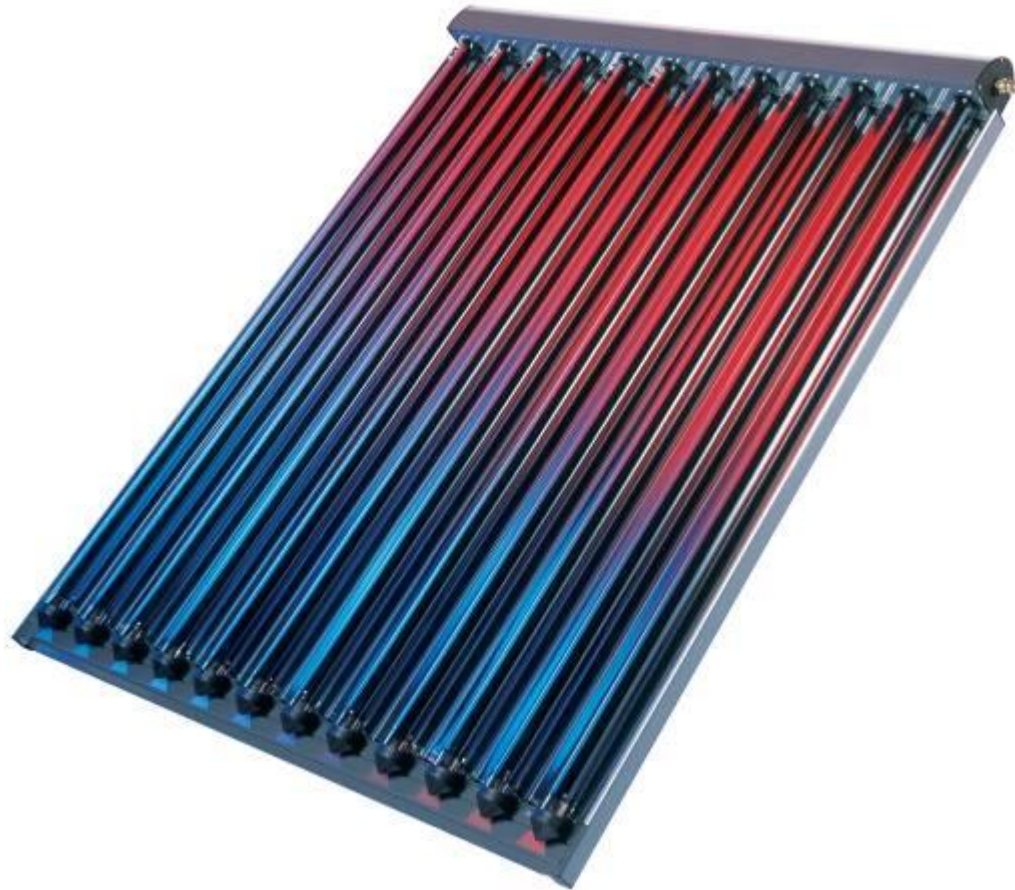
O aquecimento de piscinas a temperaturas entre 26 e 30o C é normalmente promovido por coletores solares abertos



Modelos de Coletores Solares Abertos

Coletor Solar com tubo evacuado

Este coletor solar consiste de dois tubos de vidro. O tubo mais externo é transparente para minimizar as perdas por reflexão. O tubo interno recebe uma superfície (Al-N/Al) de alta seletividade. No topo, os vidros são fundidos, sendo feito vácuo na região anular entre eles.



Detalhe construtivo do duplo tubo

Coletor Solar com tubo evacuado





a



b



c



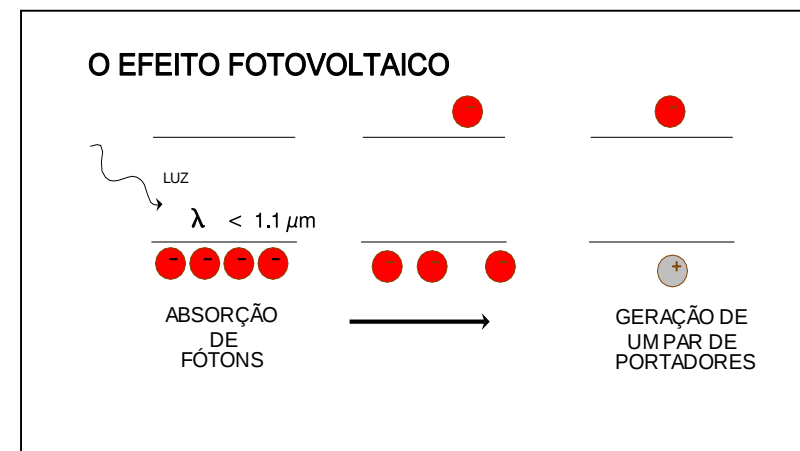
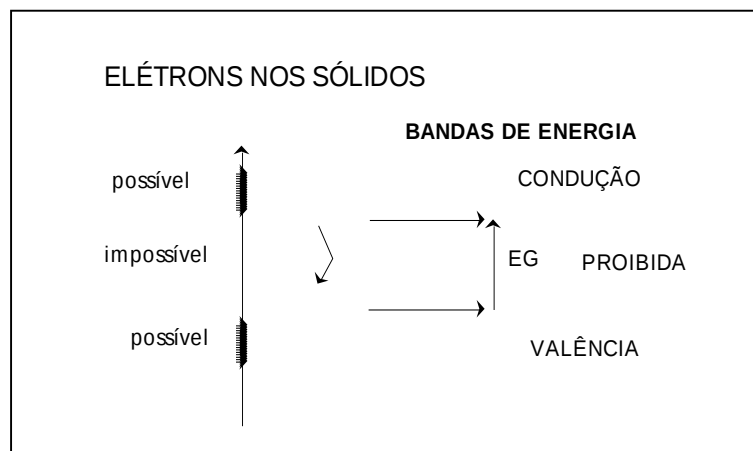
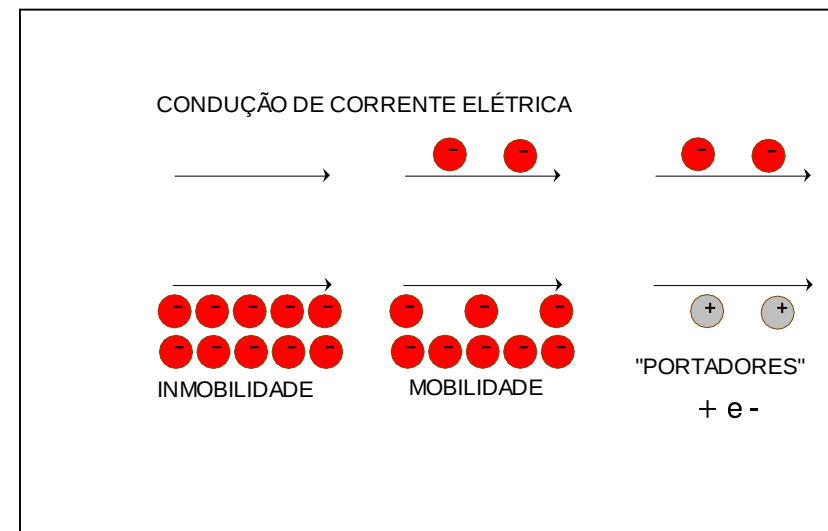
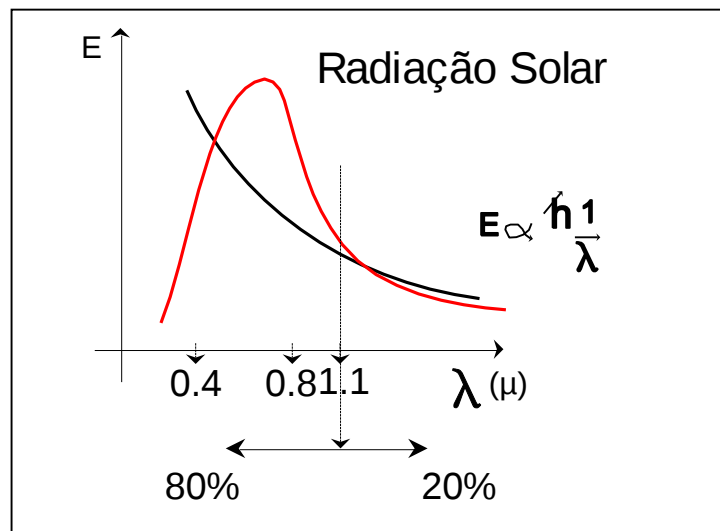
d

Figure 3.15: Large-scale CSP plants: (a) one of the original LUZ plants in California, operating for 20 years, showing the trough collectors and steam turbine plant; (b) an aerial view of the LUZ plants at Kramer Junction, California; (c) photo of eSolar's 5-MW demonstration plant in California; (d) aerial view of Abengoa Solar's PS10 and PS20 near Seville, Spain.

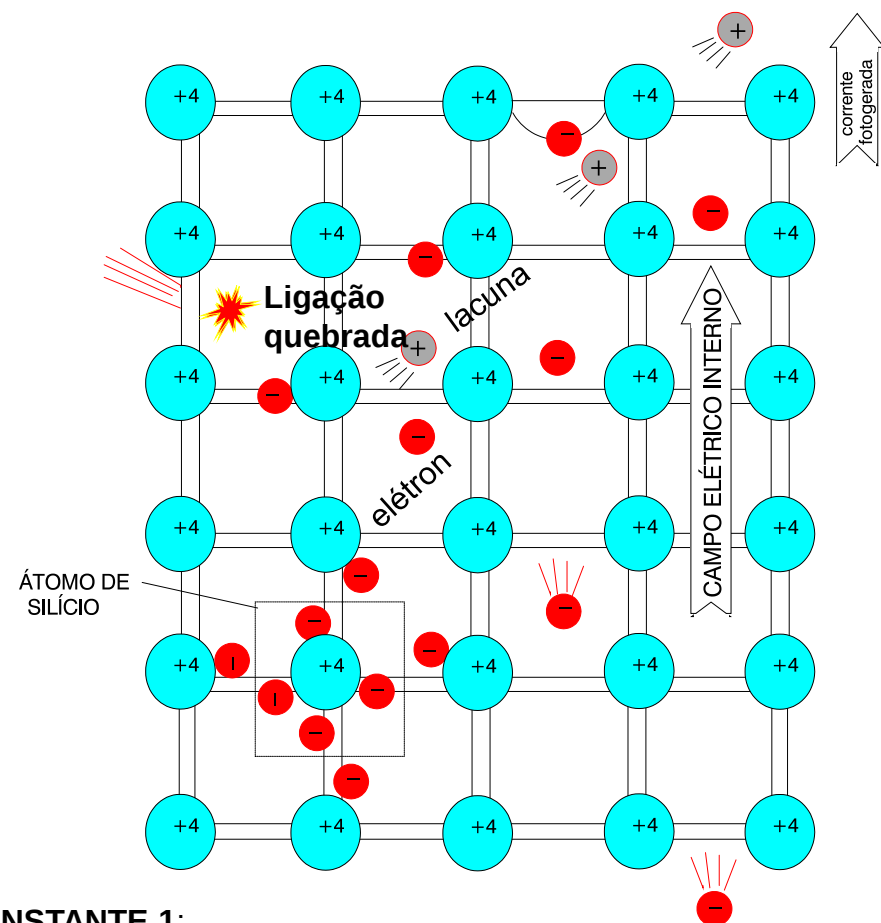
Conversão Fotovoltaica

- 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.

LUZ E ENERGIA



FÍSICA DA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA



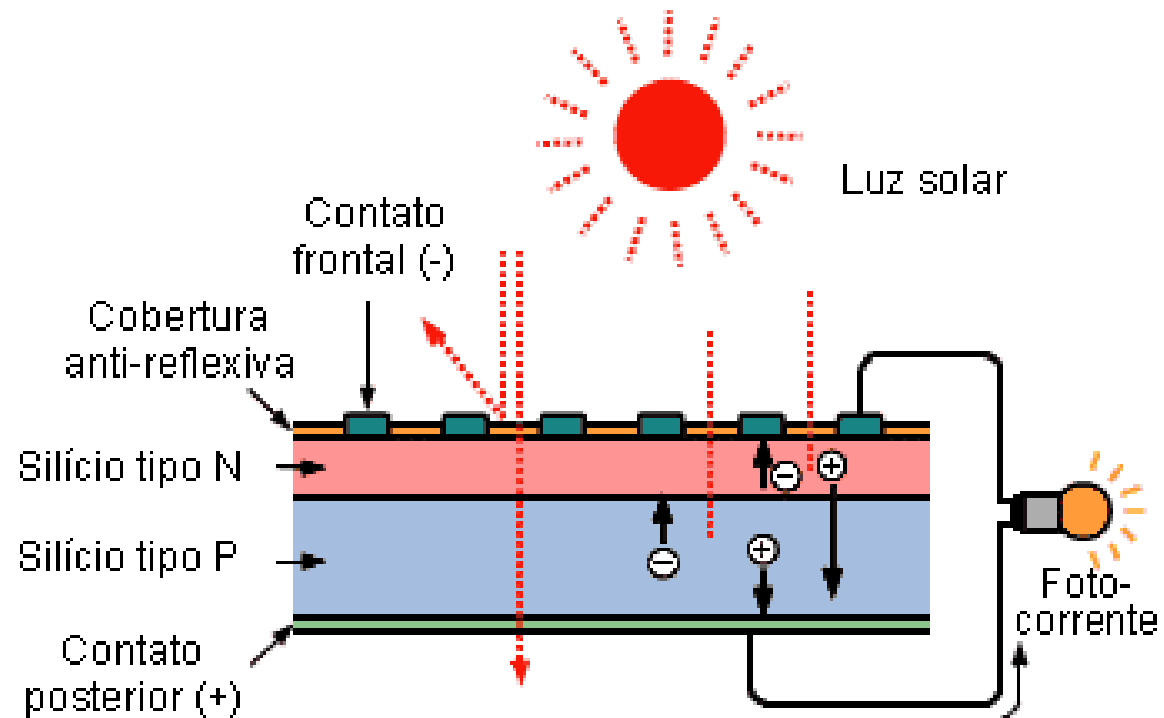
INSTANTE 1:
Absorção de
um fóton

INSTANTE 2:
Geração de
um par
elétron-lacuna

INSTANTE 3:
Movimento da
lacuna devido ao
"salto" de um
elétron

INSTANTE 4:
Separação de elétron e lacuna
pelo campo elétrico interno,
formação da corrente elétrica

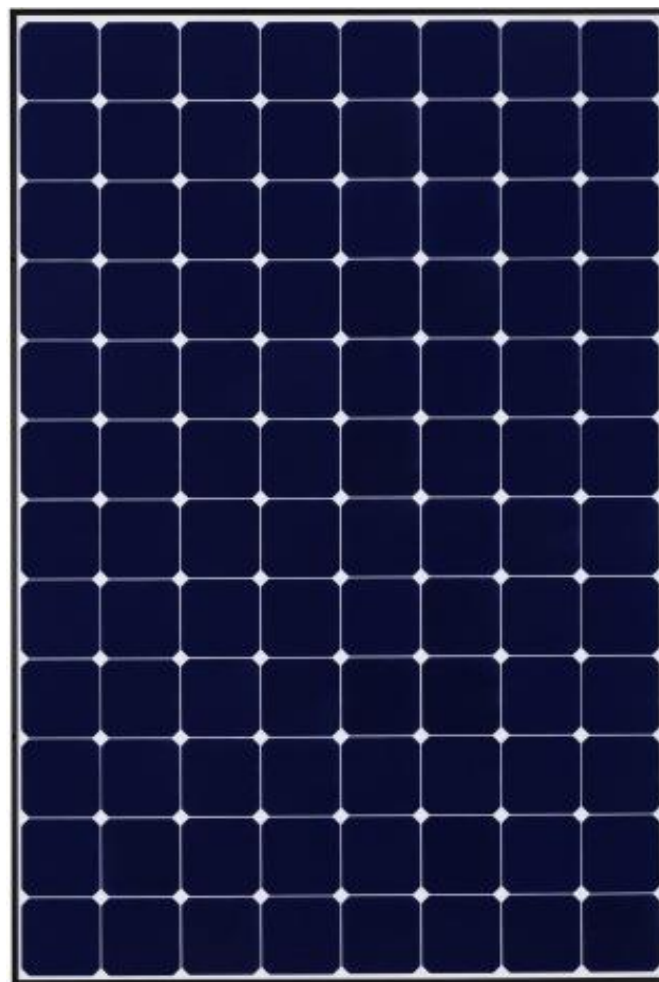
EFEITO FOTOVOLTAICO



Limitações no processo de conversão:
Nem todos os fótons são aproveitados

Tecnologias de materiais para células fotovoltaicas

- SILÍCIO MONOCRISTALINO
- SILÍCIO MULTICRISTALINO
- Amorphous silicon
- Nanocrystalline silicon
- Cadmium telluride CdTe (também CdTe/CdS)
- Copper-Indium Selenide CIS
- Copper indium gallium selenide CIGS
- Gallium arsenide
- Dye-sensitized solar cells (DSSC)
- Organic/polymer solar cells



SISTEMAS ISOLADOS

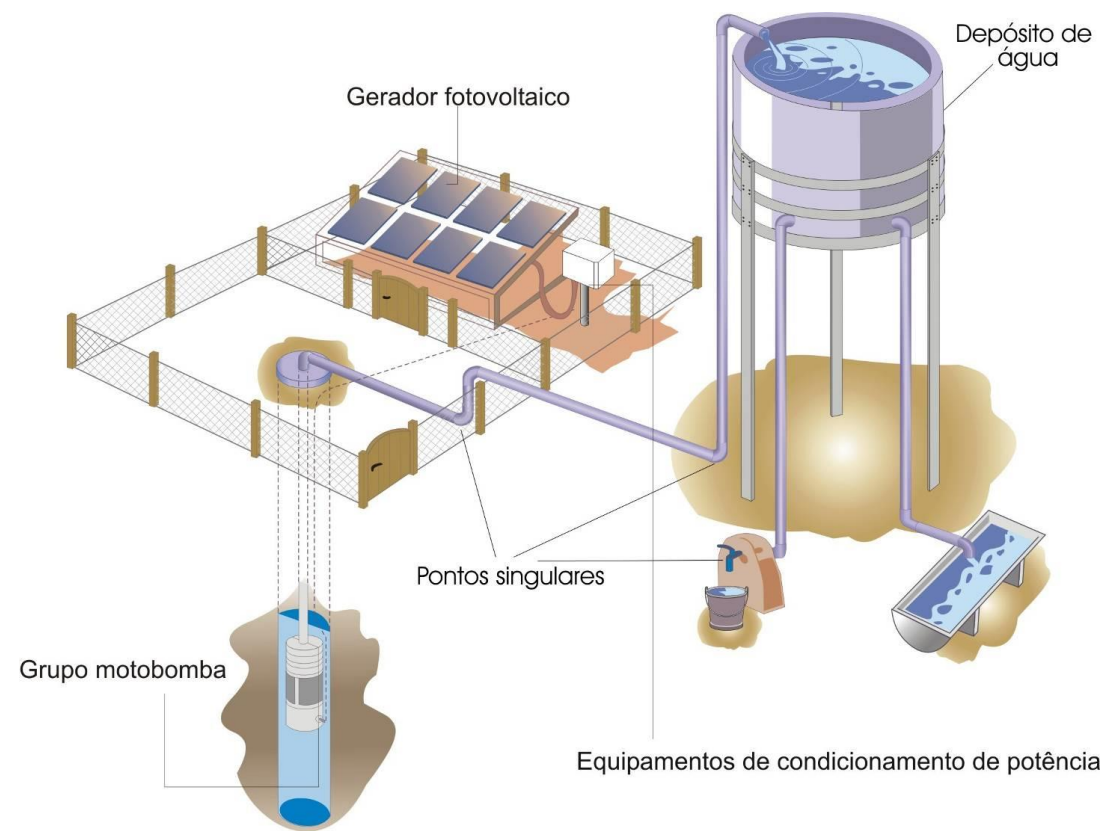
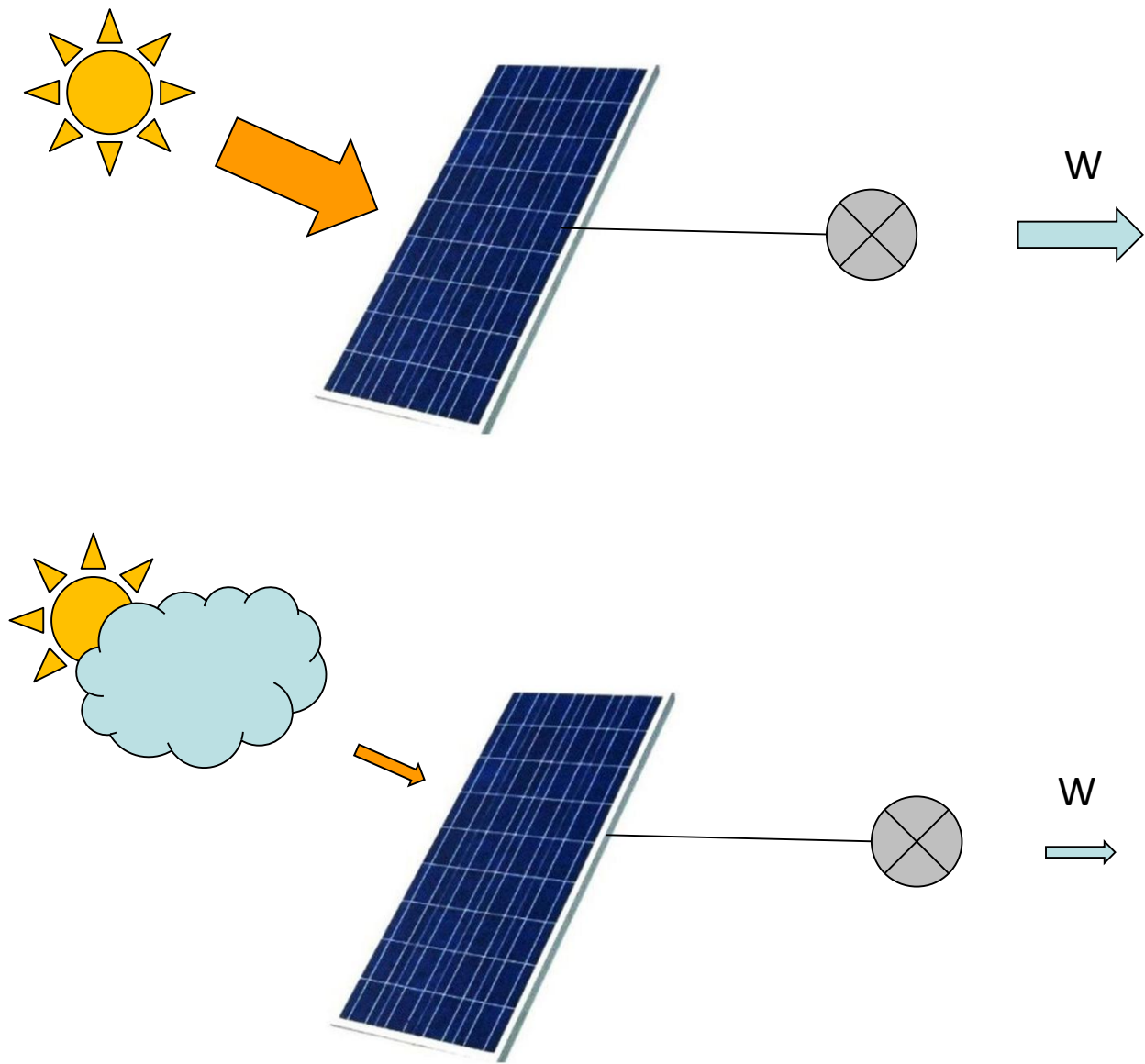


SIGFI 13, Projeto LSF-IEE, Mamirauá, AM



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

Esquema básico – sistema fotovoltaico de bombeamento





Sistemas individuais – Resolução ANEEL 83/2004



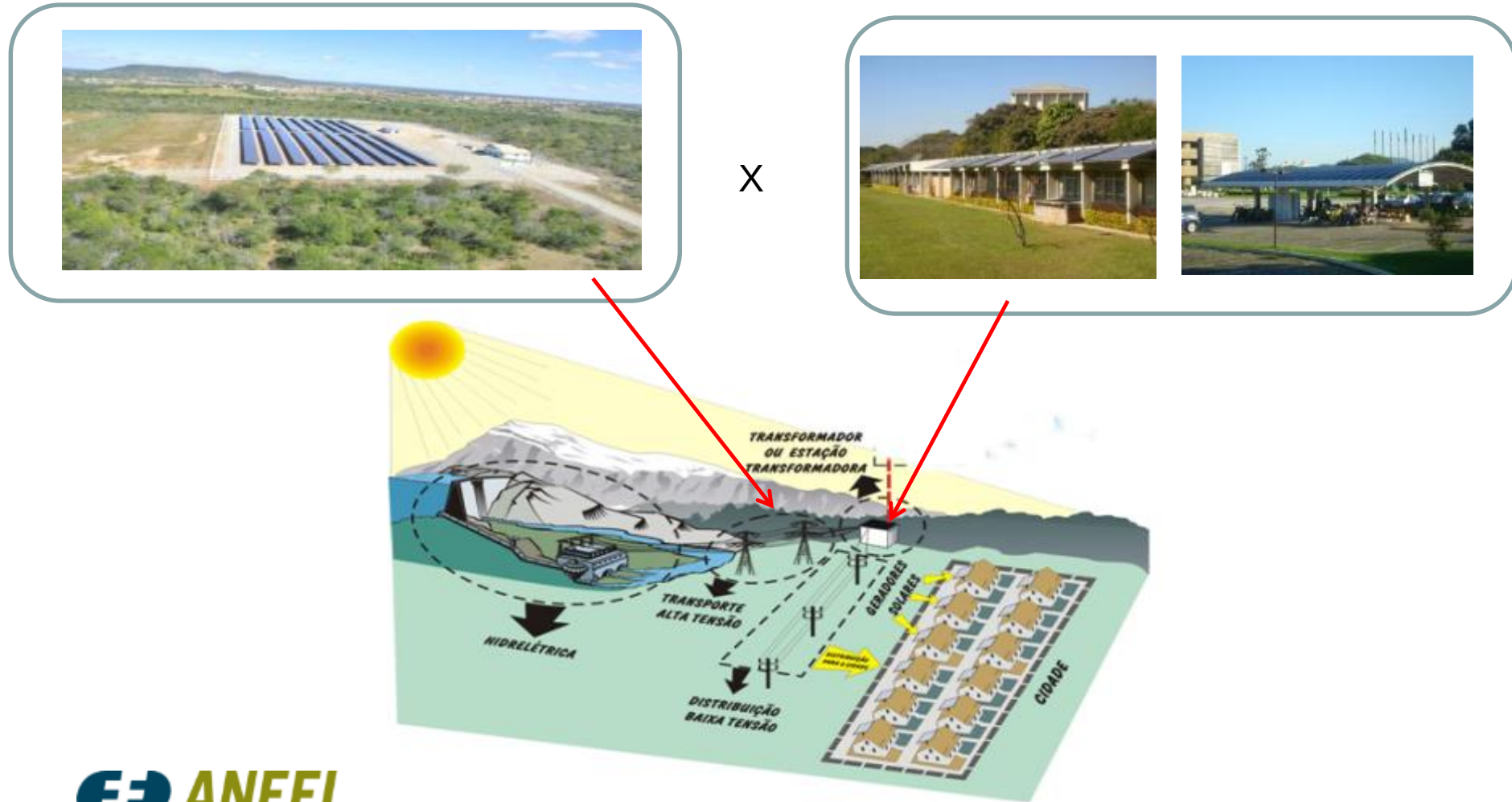
Minirredes em sistemas isolados



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.

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

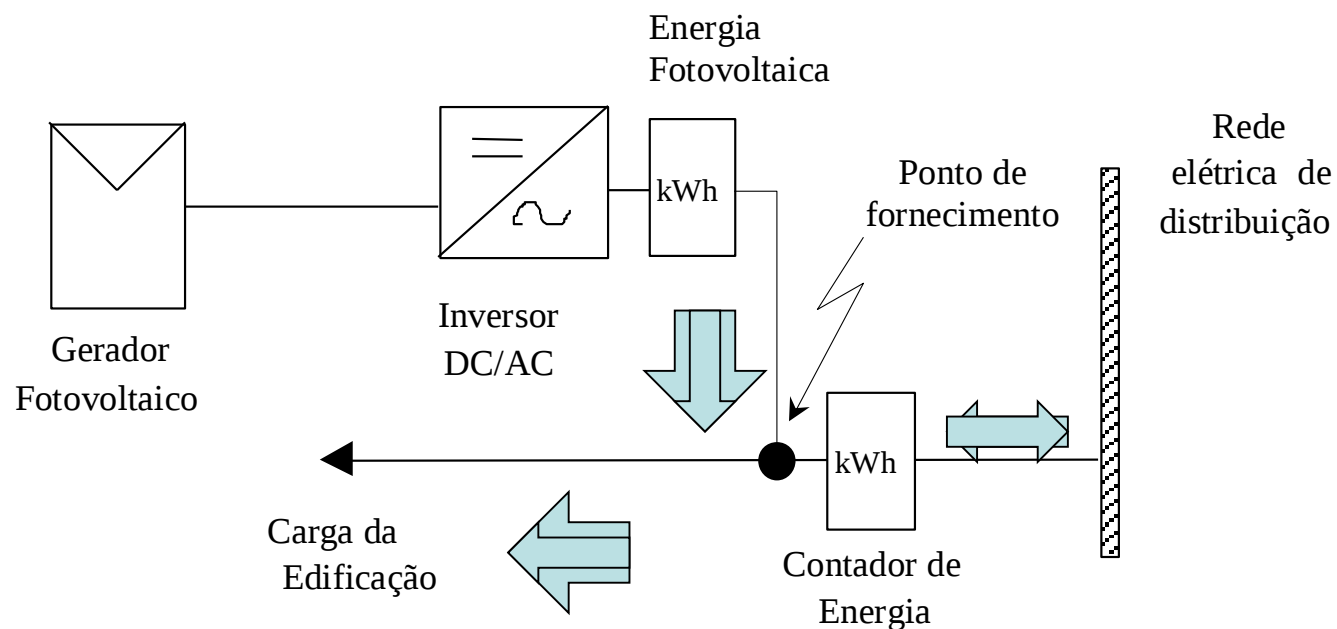


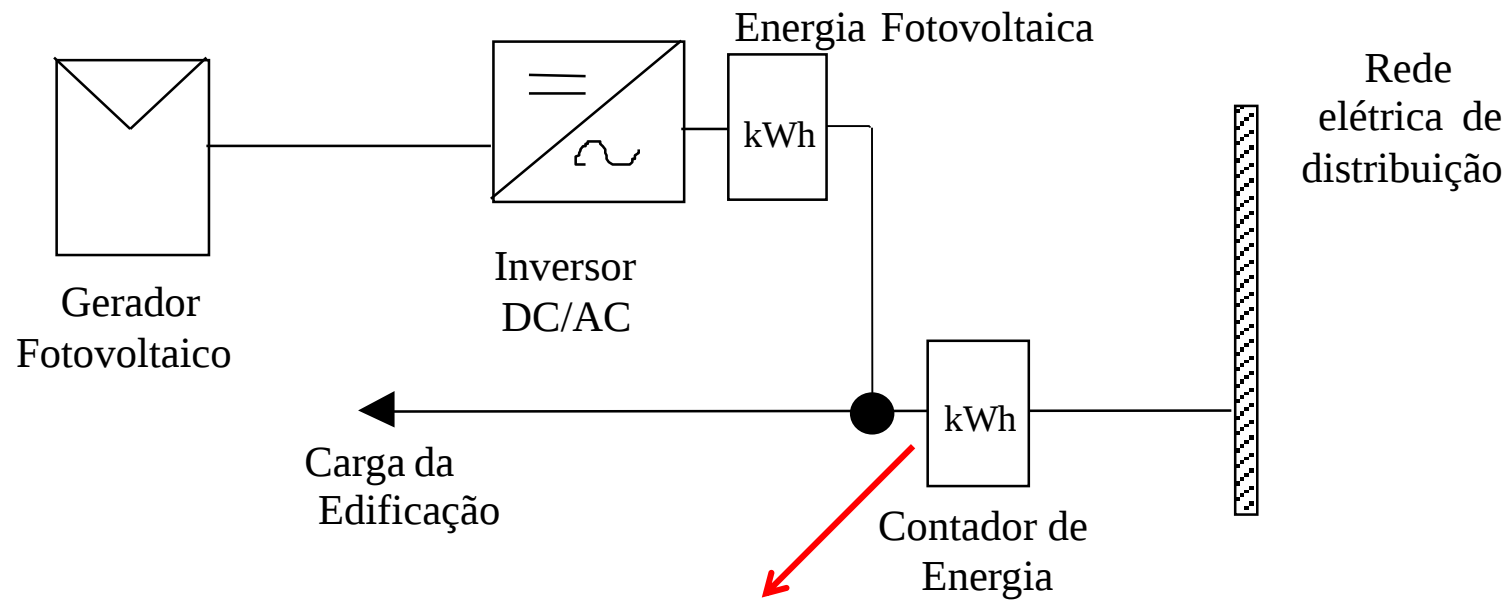
RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012 (Nº 687/2015)

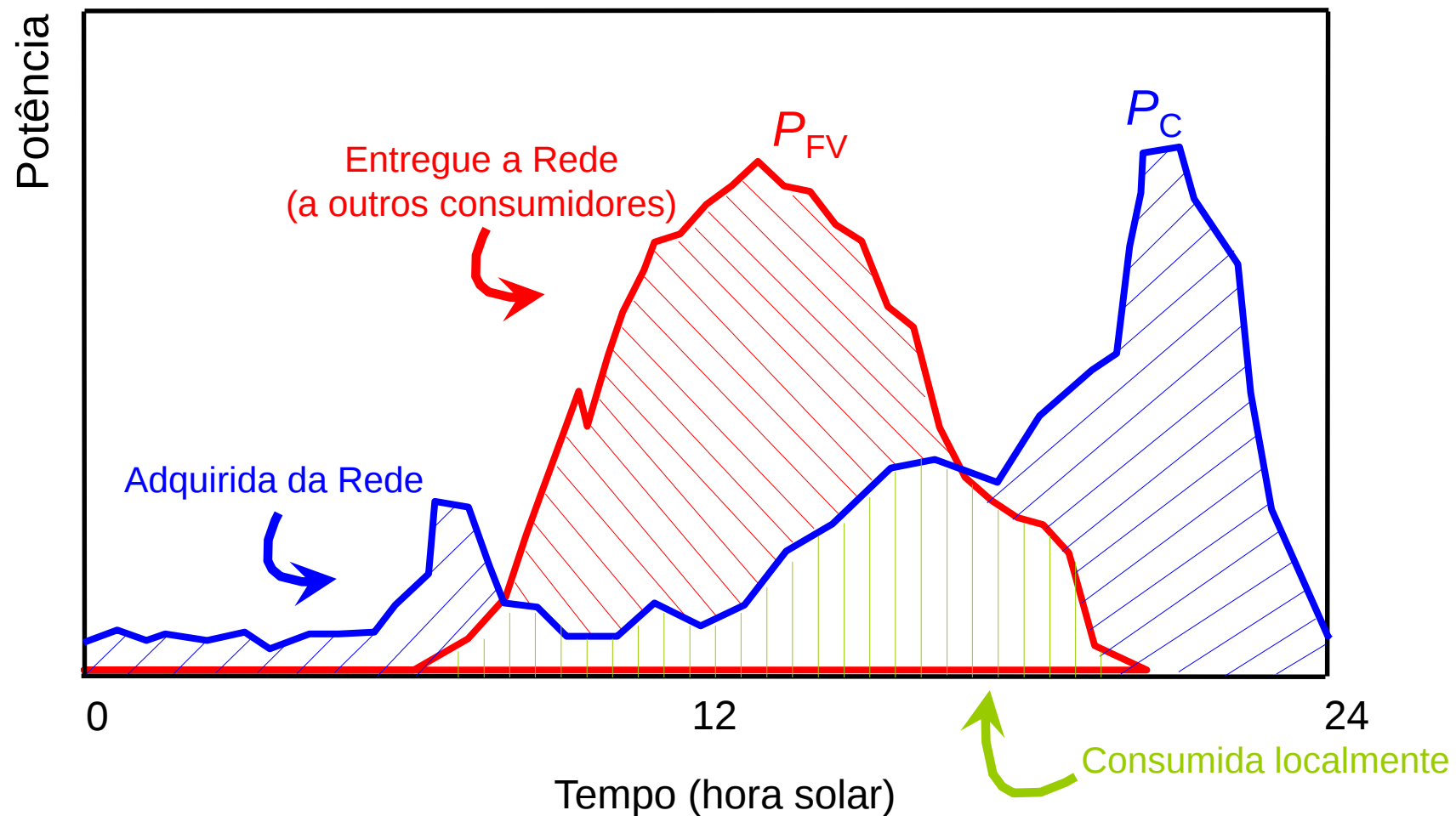
Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências.

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.



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

Usina solar fotovoltaica da USP



540 kWp, IEE-USP

Sistema Central, 156 kWp



Usina solar fotovoltaica da USP

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



Usina solar fotovoltaica da USP

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



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



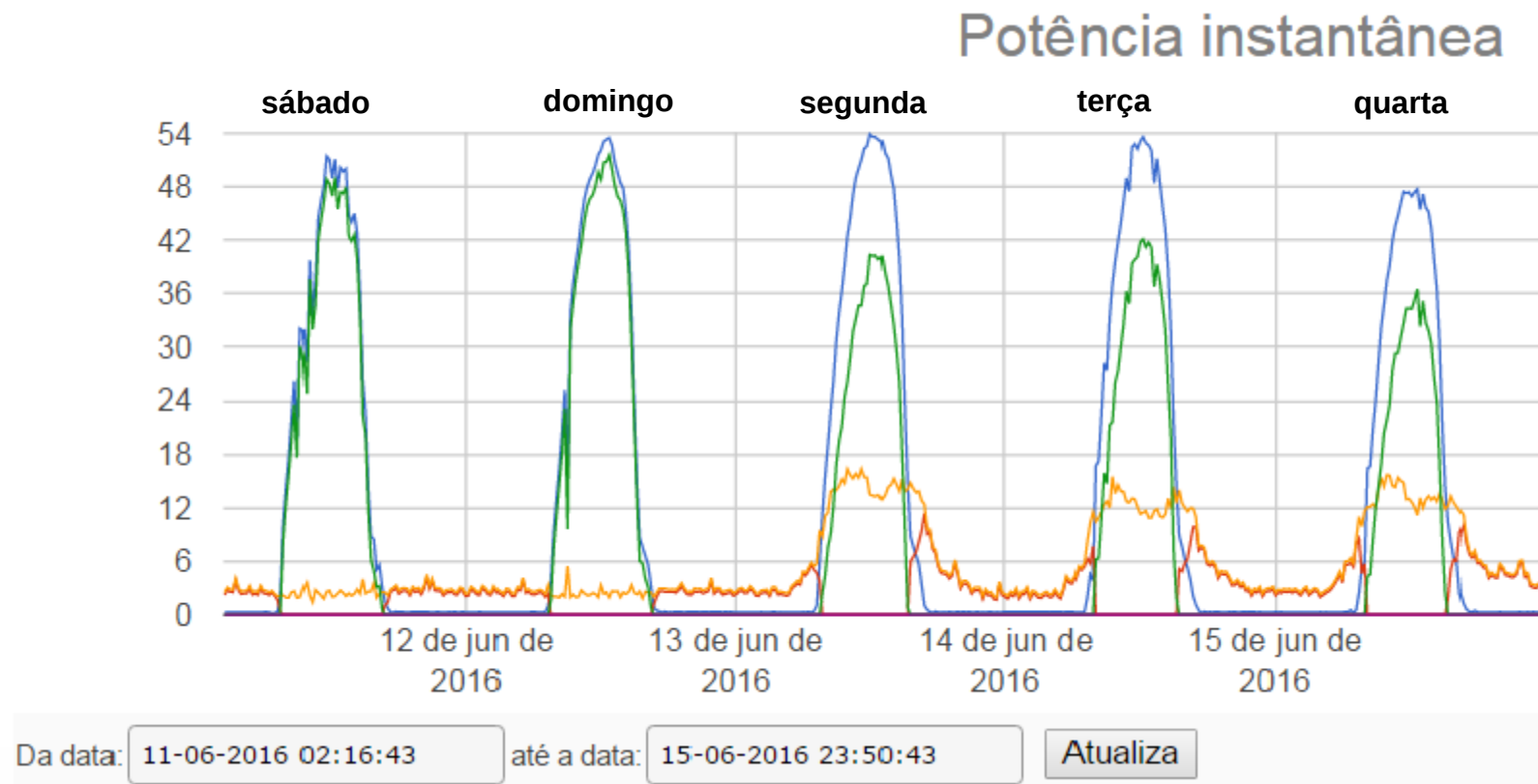
O PRÉDIO DA ADMINISTRAÇÃO DO IEE-USP



12 kWp



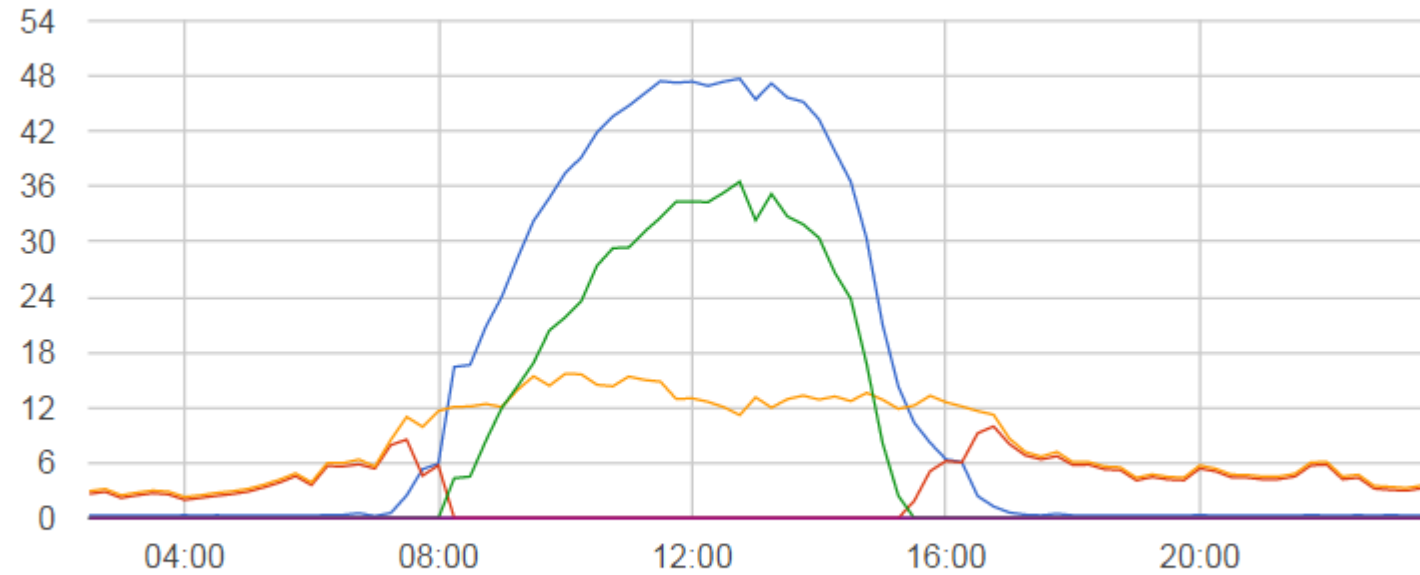
78 kWp



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

Potência instantânea

quarta



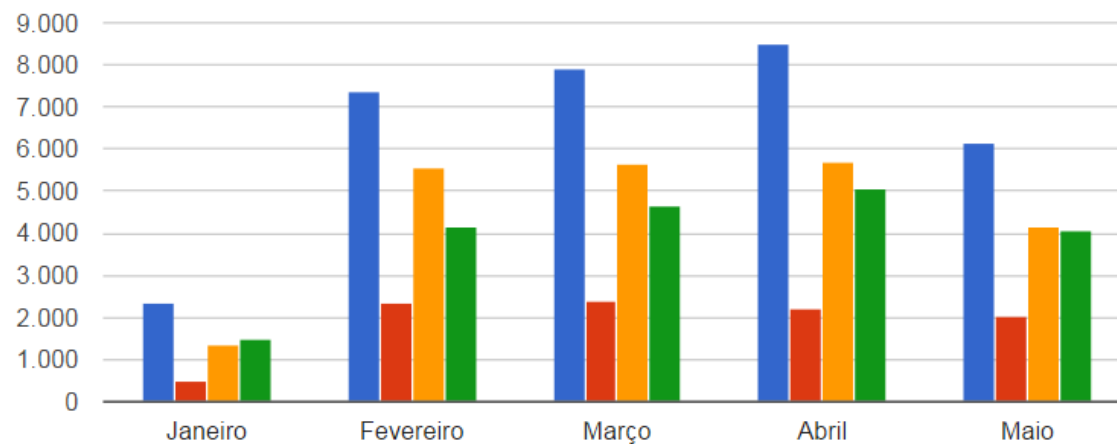
Da data: 15-06-2016 02:16:43

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]

Energia mensal



Da data: 17-06-2015



até a data: 16-06-2016



Atualiza

- Energia Produzida - Mensal [kWh]
- Energia Absorvida - Mensal [kWh]
- Energia Consumida - Mensal [kWh]
- Energia Fornecida - Mensal [kWh]

Mês	Produção (kWh)	Rede (kWh)	Consumo (kWh)
Fevereiro	7.388	2.346	5.566
Março	7.921	2.390	5.671
Abril	8.525	2.238	5.682
Maio	6.172	2.040	4.147
Soma	30.006	9.014	21.066



Benefícios da Fonte Solar Fotovoltaica ao Brasil

Fonte: ABSOLAR, 2022.



Mais de **15,3 GW** operacionais.

Dados acumulados desde 2012.



Mais de **R\$ 82,1 bilhões** em novos investimentos.



Mais de **459 mil** novos empregos gerados.



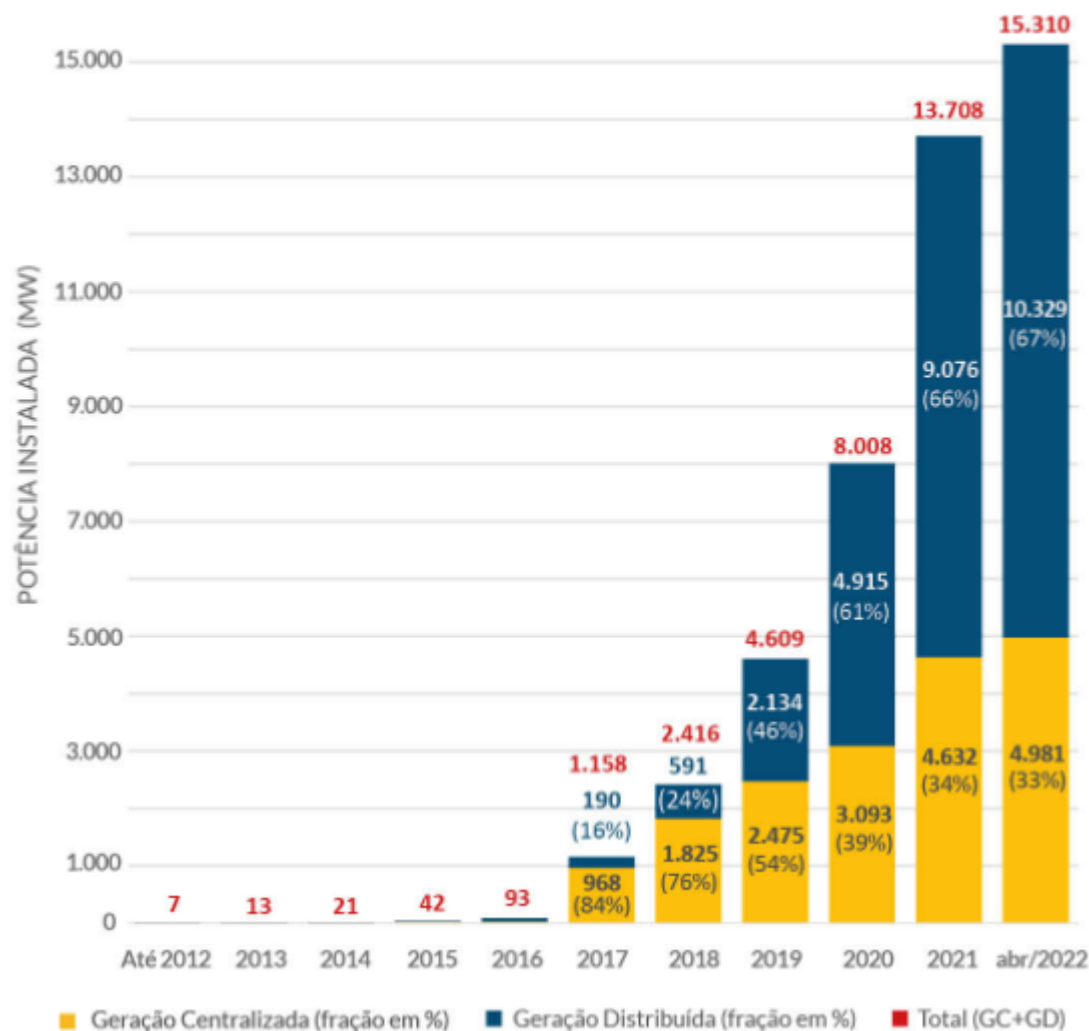
Mais de **R\$ 22,1 bilhões** em arrecadação de tributos.



Mais de **22,0 milhões de toneladas** de CO₂ evitadas.

Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil

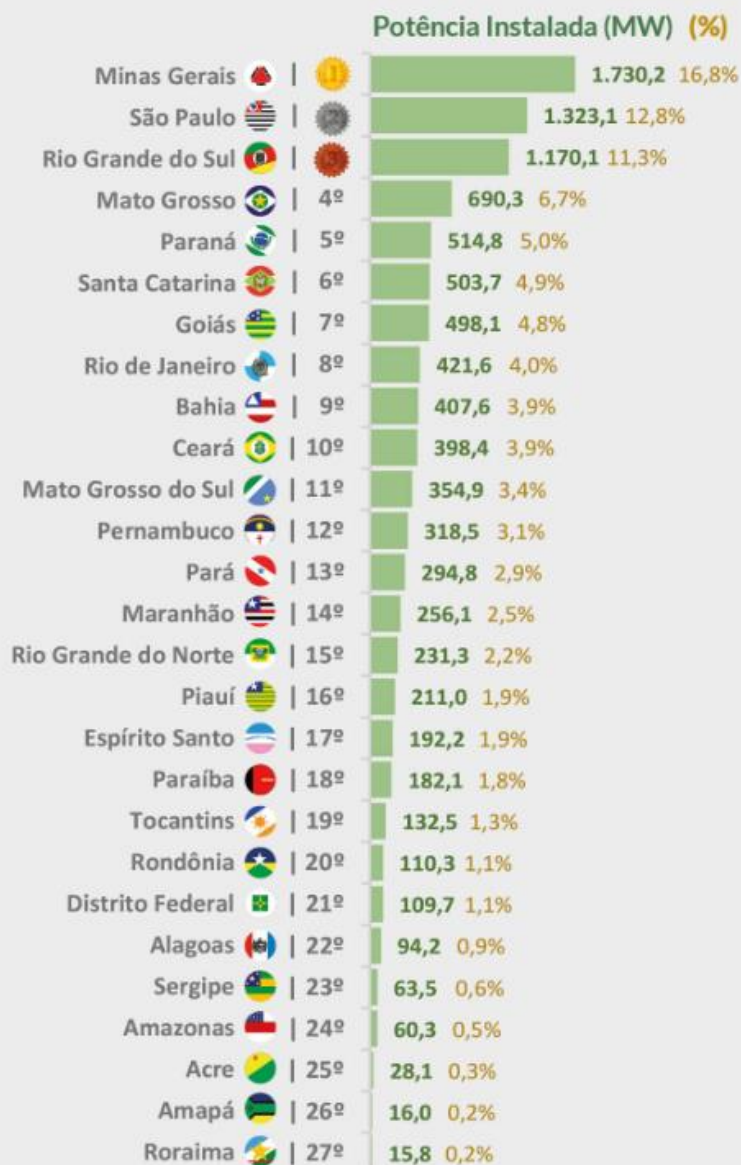
Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.



Geração Distribuída

Ranking Estadual

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.



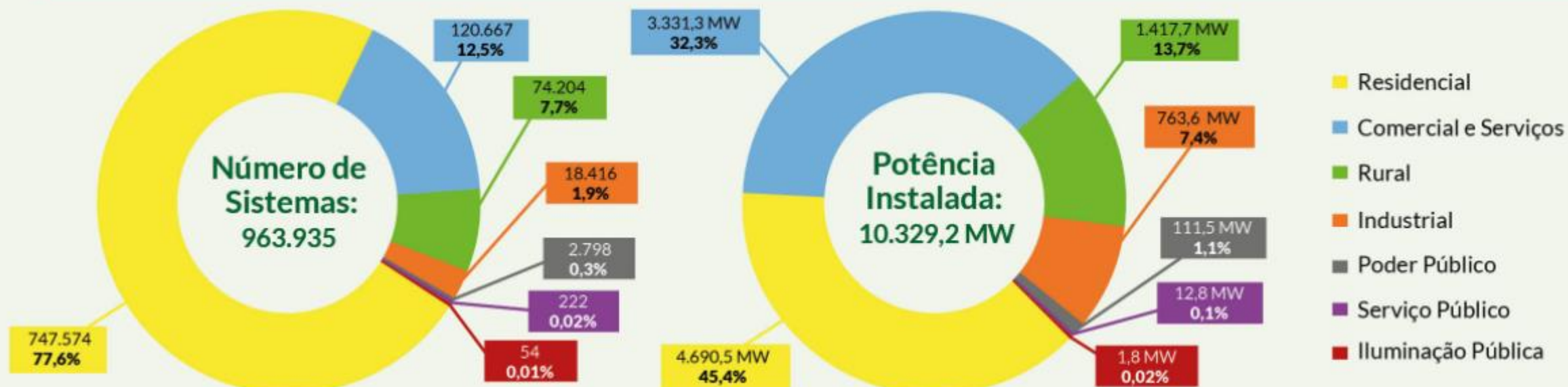
Ranking Municipal

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.



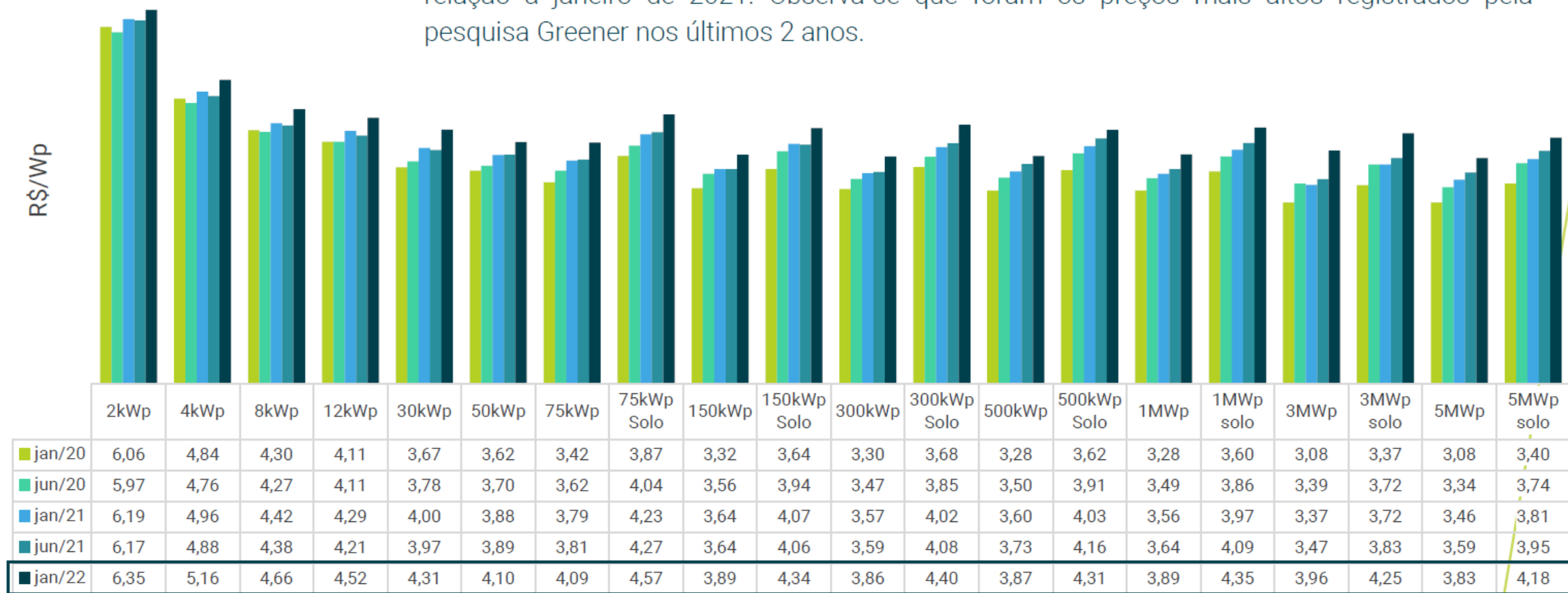
Geração Distribuída Solar FV no Brasil por Classe de Consumo

Fonte: ANEEL/ABSOLAR, 2022.



Preços sistemas FV

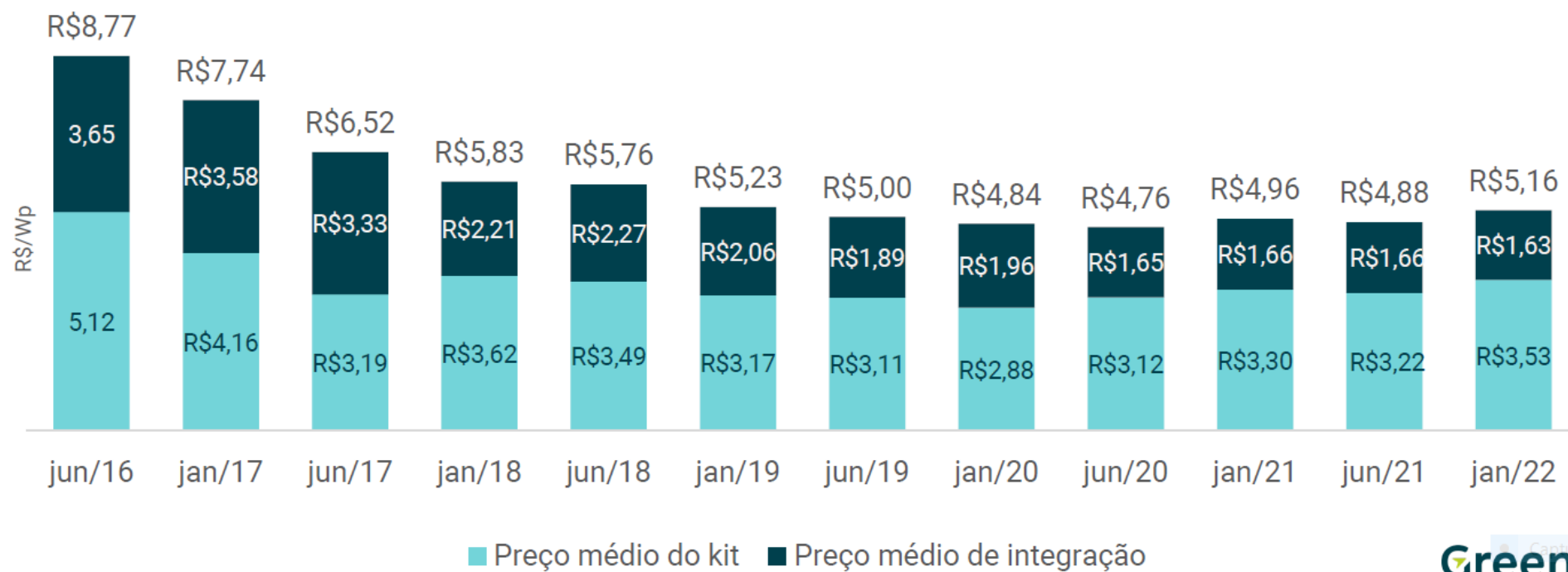
- Os preços para o cliente final em janeiro de 2022 apresentaram **incremento médio de 8%** em relação à janeiro de 2021. Observa-se que foram os preços mais altos registrados pela pesquisa Greener nos últimos 2 anos.



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

Dados do Cliente/Unidade Consumidora

Nº DA INSTALAÇÃO: [REDACTED] Nº DO CLIENTE: [REDACTED]

CPF/CNPJ: [REDACTED] INSC. EST: ISENTA

[REDACTED]

Classificação da Unidade Consumidora

Grupo B Subgrupo B1 Classe RESIDENCIAL

Subclasse RESIDENCIAL

Tipo de fornecimento Bifásico Modalidade Tarifária Convencional

Dados da Conta

VENCIMENTO 14 JUN 2021 TOTAL A PAGAR (R\$) 293,65

CONTA REFERENTE A MAI 2021

Dados de Medição

Nº do medidor 8184728

Leitura anterior 16 ABR 73.238

Leitura atual 18 MAI 73.594

Próxima leitura 17 JUN

Fator multiplicador 1,00000

Consumo do mês (kWh) 356,0

Número de dias 32

Histórico de Faturamento

Mês/Ano	kWh	Dias
mai/21	356	32
abr/21	263	30
mar/21	292	28
fev/21	406	32
jan/21	201	30
dez/20	161	31
nov/20	303	30
out/20	363	31
set/20	340	29
ago/20	351	32
jul/20	331	30
jun/20	405	32
mai/20	266	30

Reservado ao Fisco D103.D21A.46DCA173.B8FF.D273.6B16.C281

Data de emissão	Nº Nota fiscal	Série	Base de cálculo	Alíquota	ICMS
18 MAI 2021	315444435	B	281,37	25%	70,33

CFOP 5258: Venda de en. elétrica a não contribuinte

Descrição de Faturamento Bandeira(s) Tarifária(s) aplicada(s) no mês AMARELA VERMELHA PATAMAR I

CCI	DESCRIÇÃO	QTD kWh	TARIFA C/ICMS	BASE ICMS	ALIQ ICMS	ICMS	VALOR
0605	USO SIST. DISTR. (TUSD)	356,000	0,38065	135,51	25%	33,87	135,51
0601	ENERGIA (TE)	356,000	0,33155	118,03	25%	29,50	118,03
0698	ADICIONAL BANDEIRA AMARELA	0,000	0,00000	2,78	25%	0,69	2,78
0698	ADICIONAL BANDEIRA VERMELHA	0,000	0,00000	11,17	25%	2,79	11,17
0699	PIS/PASEP (0,89%)			2,45	25%	0,61	2,45
0699	COFINS (4,08%)			11,43	25%	2,87	11,43
0807	CIP-OSASCO - MUNICIPAL						12,28

0,71 R\$/kWh

Tarifas aplicadas (sem impostos)

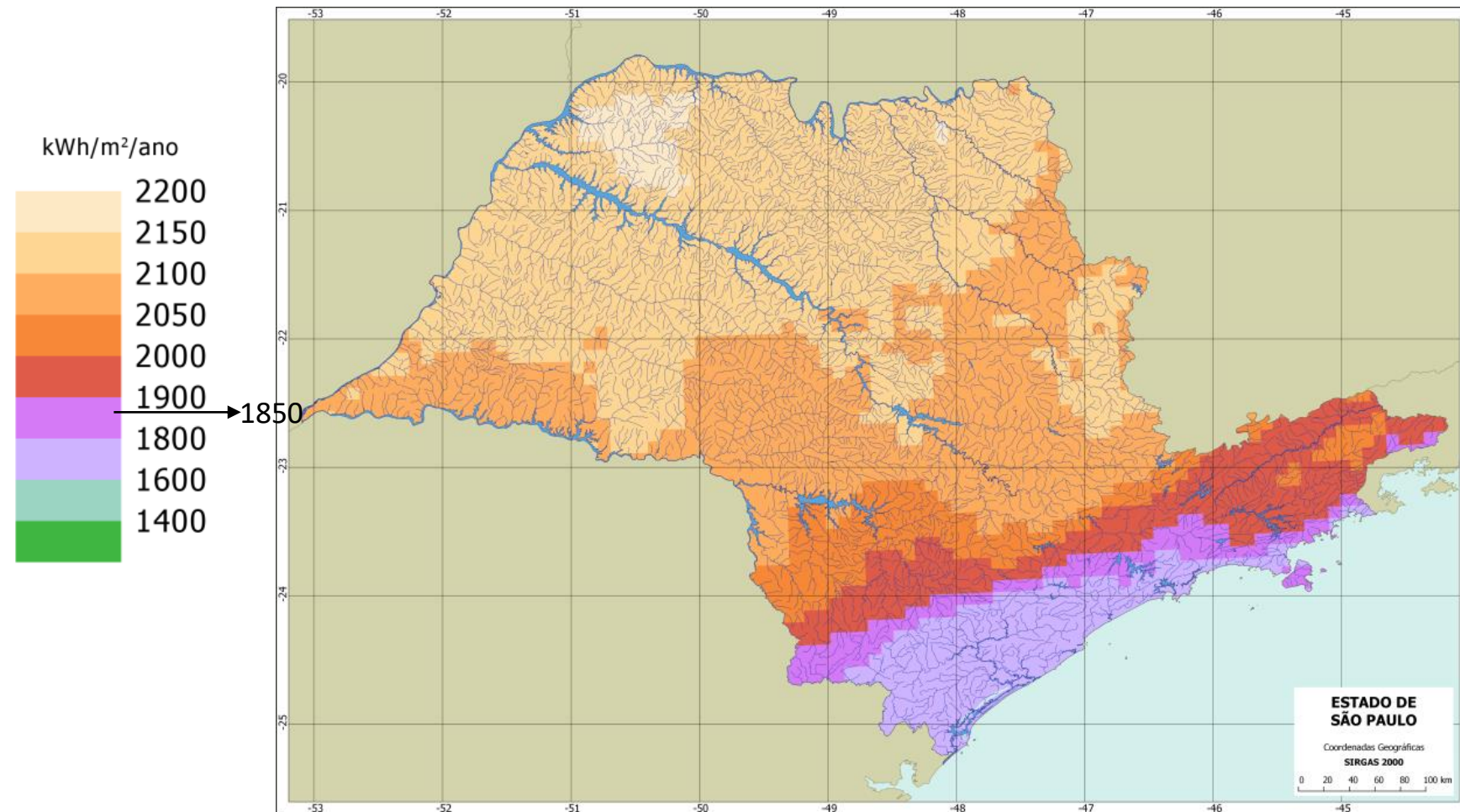
CONVENCIONAL-RESIDENCIAL

0,28551 (TUSD)

0,24868 (TE)

Valor dos Tributos: R\$ 80.77

IRRADIAÇÃO TOTAL (INCLINADA) – Total anual



Histórico de Faturamento		
Mês/Ano	kWh	Dias
mai/21	356	32
abr/21	263	30
mar/21	292	28
fev/21	406	32
jan/21	201	30
dez/20	161	31
nov/20	303	30
out/20	363	31
set/20	340	29
ago/20	351	32
jul/20	331	30
jun/20	405	32
mai/20	266	30

1850 kWh/m²

Sistema de 2 kW ~ R\$ 12.000

0,71 R\$/kWh

$\Sigma = 3772 \text{ kWh} \sim 314 \text{ kWh/mês}$

- 50 kWh (disponibilidade)

$264 \text{ kWh/mês} \times 12 = 3.168 \text{ kWh/ano}$

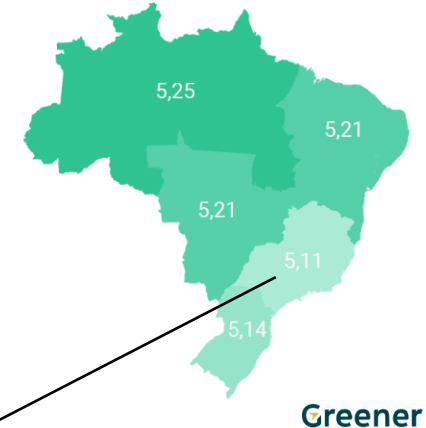
$$E_{FV} = P_{nomG} \cdot Y_R \cdot PR$$

$$P_{nomG} = E_{FV} / (1850h \times 0,75)$$

$$P_{nomG} = 3.168 \text{ kWh} / (1850h \times 0,75) = 2,3 \text{ kW}$$

Preços de sistemas fotovoltaicos por região
Sistema residencial (4 kWp)

Preço Médio por Macrorregião	
Região	Preço Médio (R\$/Wp)
Nordeste	5,21
Sudeste	5,11
Centro-Oeste	5,21
Norte	5,25
Sul	5,14



Poupança (6%/ano)
R\$ 705

R\$ 11.753,00

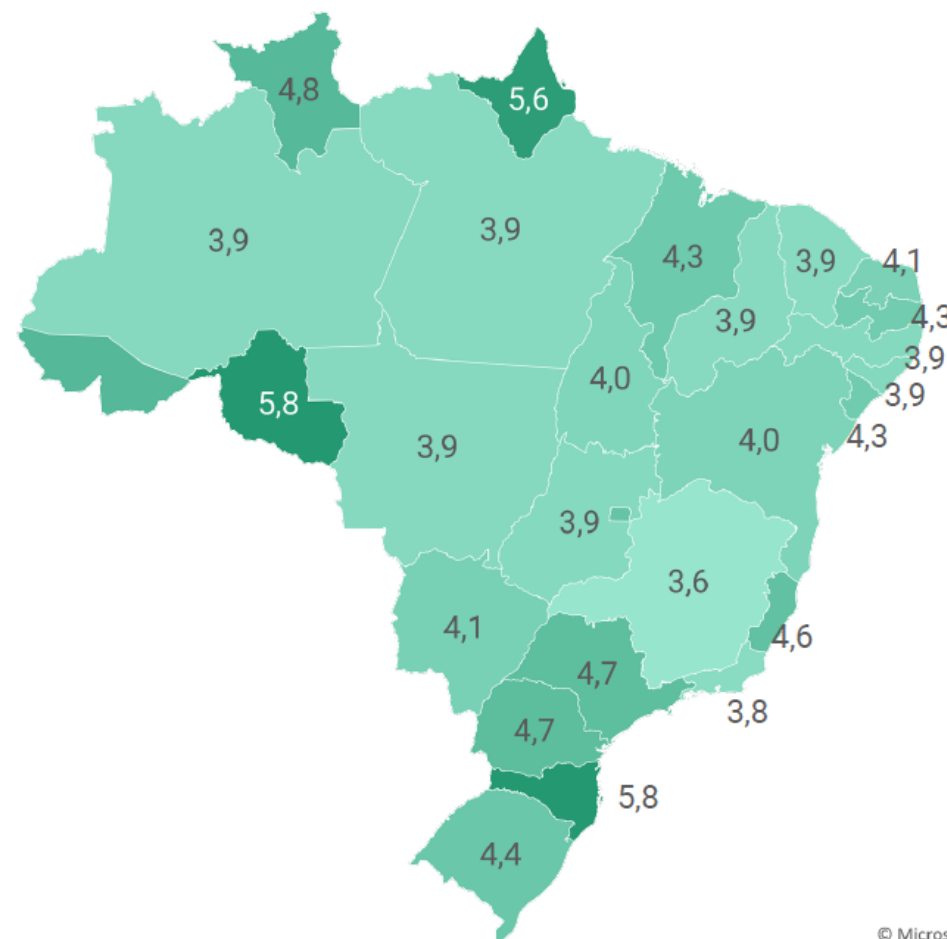
0,71 R\$/kWh

$3.168 \text{ kWh} \times 0,71 \text{ R$/kWh} = \text{R\$ } 2.249 \text{ R\$/ano}$

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

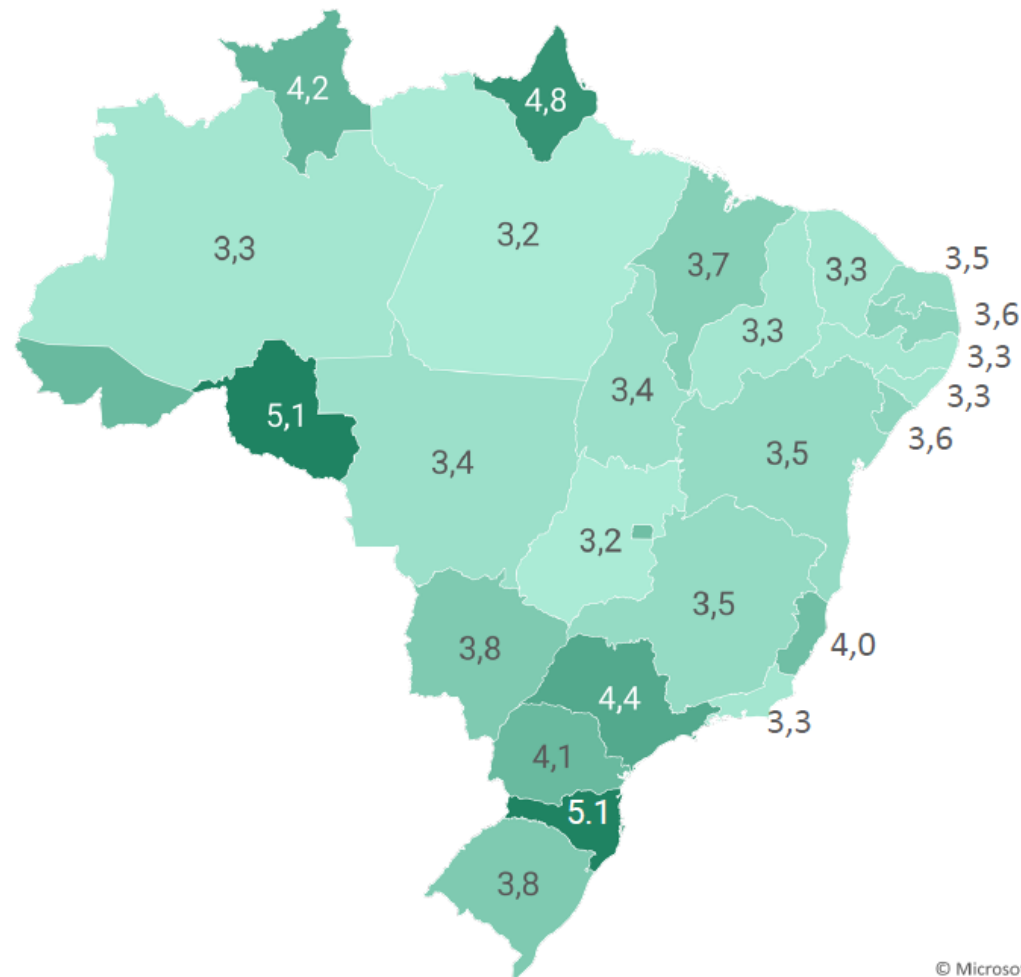
*PR = Performance Ratio

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

Payback médio por Estado

Comercial – Baixa Tensão (em anos)

- ▶ O valor dos sistemas comerciais foi de **R\$ 4,10/Wp** (dados médios conforme pesquisa GD 2º sem. 2021 para sistemas de **50 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 **70%**.



Powered by Bing
© Microsoft, OpenStreetMap

Greener

*PR = Performance Ratio

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

COMO FAÇO PARA TER ELETRICIDADE SOLAR NA MINHA CASA

<http://www.americadosol.org/guiaFV/>

Marco Legal MMGD (Lei 14.300/2022)

Recomenda-se ver o seguinte estudo: **Análise do Marco Legal da Geração Distribuída**



Comparação da Lei 14.300/2022 com a REN 482/2012

Item	REN 482/2012	Lei 14.300/2022 (Marco Legal MMGD)
Valor da compensação	Compensação considerando todas as componentes da tarifa de eletricidade*	➤ Compensação considerando todas as componentes <u>menos</u> a TUSD Fio B. ➤ Na modalidade de autoconsumo remoto com potência maior que 500 kW ou geração compartilhada**, compensação considerando todas as componentes <u>menos:</u> a TUSD Fio B, 40% da TUSD Fio A, TFSEE, e P&D.

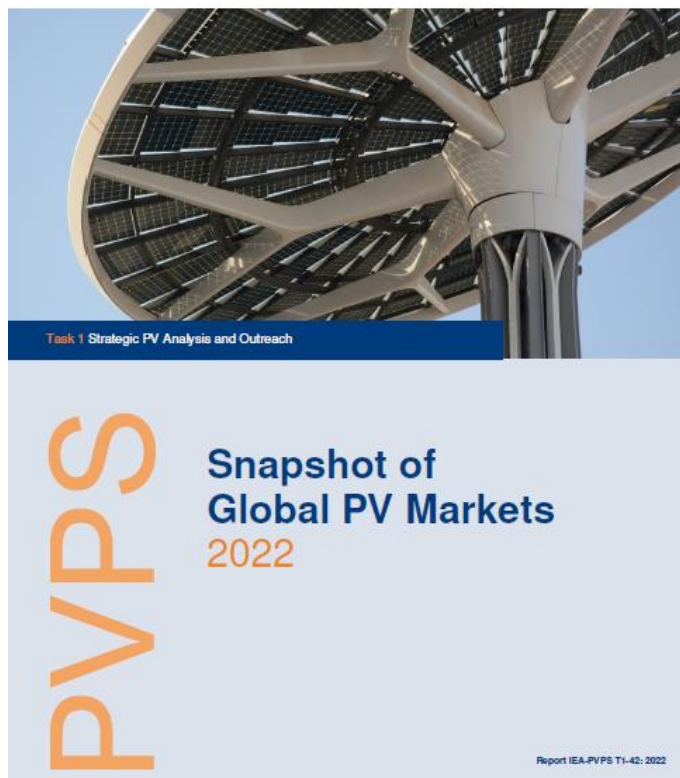
Comparação da Lei 14.300/2022 com a REN 482/2012

Item	REN 482/2012	Lei 14.300/2022 (Marco Legal MMGD)
Permanência na regra atual	N/A	Sistemas de MMGD que protocolarem solicitação de acesso <u>antes</u> do início da regra, permanecem na REN 482/2012 até 31 de dezembro de 2045.
Início da regra de transição	N/A	<u>Após</u> 12 meses da publicação da lei.
Regra de transição	N/A	Quem protocolar solicitação de acesso <u>depois</u> do início da regra, e estiver enquadrado nas seguintes modalidades de compensação: • Micro GD • Mini GD • Geração compartilhada • EMUC • Autoconsumo remoto limitado até 500 kW de potência instalada ➤ Pagará a TUSD Fio B de forma gradual por 6 anos, até chegar a 100%.

- Após a entrada em vigência da regra (12 meses após a publicação da lei):

2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045
15%	30%	45%	60%	75%	90%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

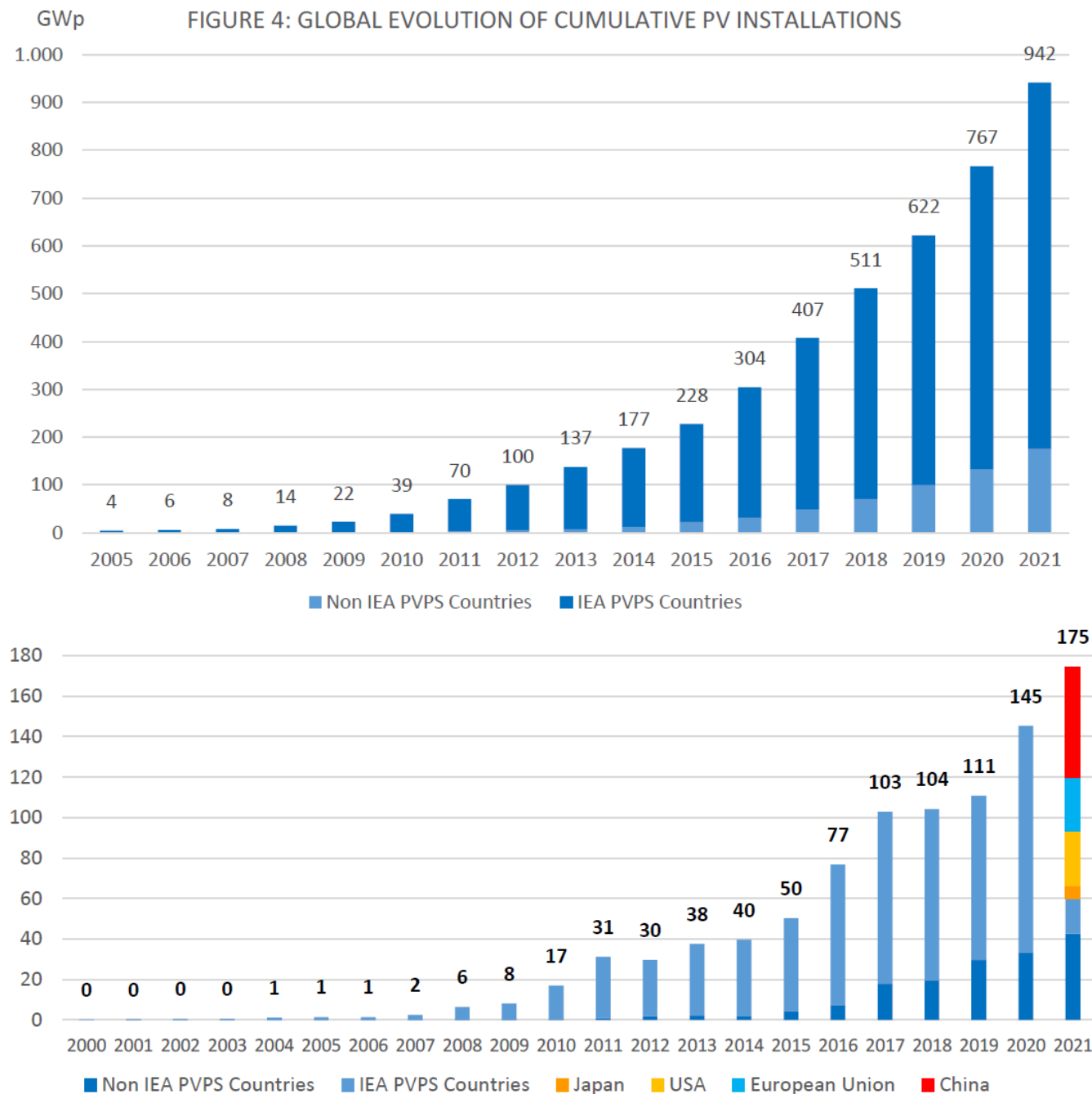
Período de transição: aumento gradativo do percentual das componentes tarifárias relativas à TUSD Fio B.



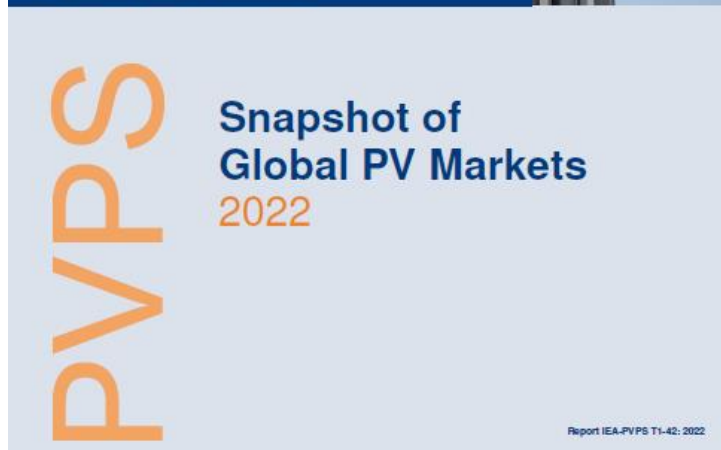
Snapshot 2022 - IEA-PVPS

Source: Report IEA PVPS T1-42:2022 - *Snapshot of Global PV Markets* (2022, April)

FIGURE 4: GLOBAL EVOLUTION OF CUMULATIVE PV INSTALLATIONS



Source: IEA PVPS

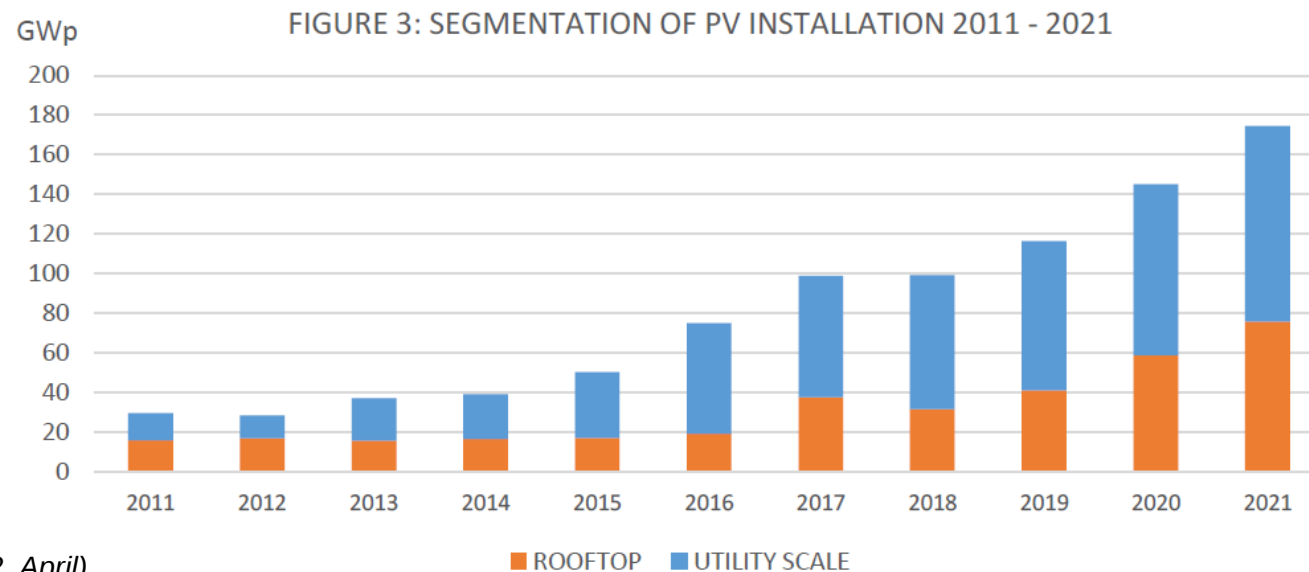


Snapshot 2022 - IEA-PVPS

Fonte: Report IEA PVPS T1-42:2022 - Snapshot of Global PV Markets (2022, April)

FOR ANNUAL INSTALLED CAPACITY					FOR CUMULATIVE CAPACITY				
1		China	54,9 GW		1		China	308,5 GW	
2		USA	26,9 GW		(2)		European Union*	178,7 GW	
(3)		European Union*	26,8 GW		2		USA	123 GW	
3		India	13 GW		3		Japan	78,2 GW	
4		Japan	6,5 GW		4		India	60,4 GW	
5		Brazil	5,5 GW		5		Germany	59,2 GW	
6		Germany	5,3 GW		6		Australia	25,4 GW	
7		Spain	4,9 GW		7		Italy	22,6 GW	
8		Australia	4,6 GW		8		Korea	21,5 GW	
9		Korea	4,2 GW		9		Spain	18,5 GW	
10		France	3,3 GW		10		Vietnam	17,4 GW	

Source: IEA PVPS



Source: IEA PVPS, Becquerel Institute

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

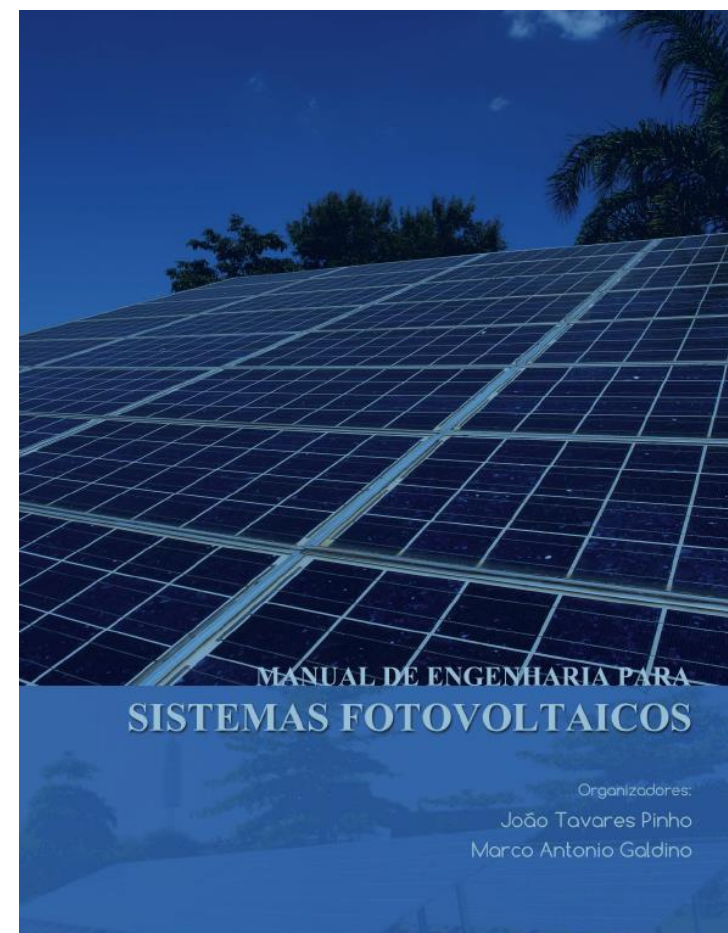
1.1 – Energia solar térmica

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)