

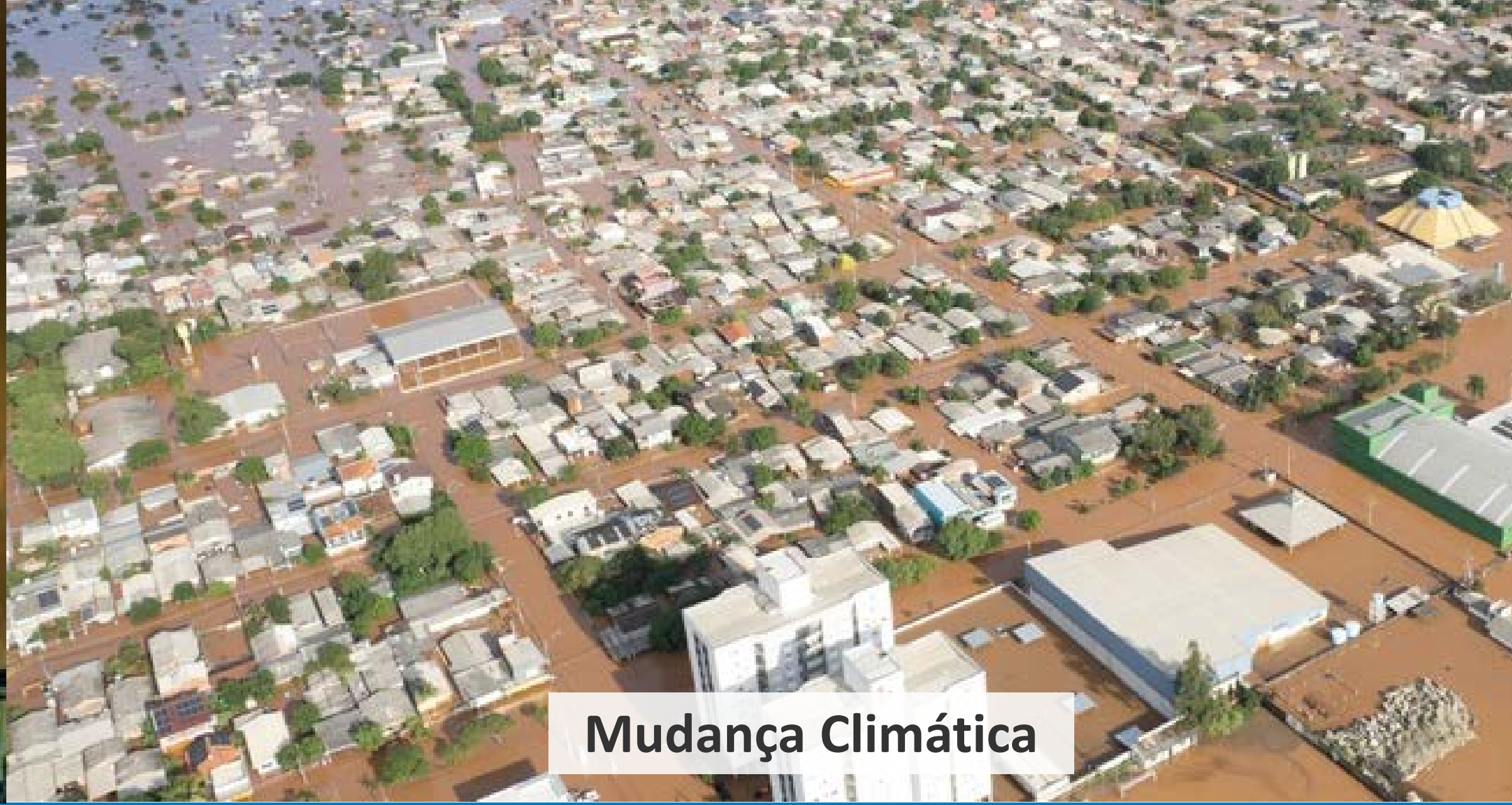
Avançando na Transição Energética: Desafios e Estratégias para a Implantação Sustentável de FV

Silvana Ovaitt (nee Ayala Pelaez)
Heather Mirletz, Nikita Dutta,
Luca Allione (TU Delft), Teresa M. Barnes
May 2024

X Congresso Brasileiro de Energia Solar



Poluição



Mudança Climática



Perda de biodiversidade

Tripla Crise Planetária

A **tripla crise planetária** refere-se às três principais questões que a humanidade enfrenta atualmente, que se reforçam mutuamente e causam mais danos. Cada uma delas deve ser resolvida para que possamos ter um futuro viável neste planeta.



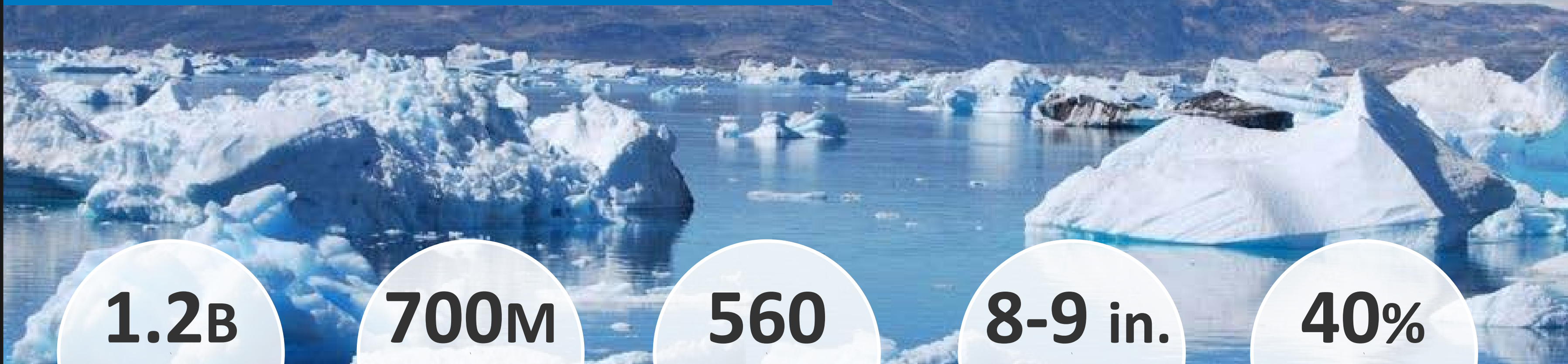
Mudança Climática

- Requer a redução das emissões em 45% até 2030, Net Zero carbon até 2050 para limitar o aumento da temperatura a 1.5°C
- Causa secas, incêndios florestais, elevação do nível do mar, inundações, derretimento do gelo polar, tempestades catastróficas
- Desorganiza os ritmos e habitats de plantas e animais



Inundações no Rio Grande do Sul, Maio 2024. Imagem da cidade Novo Hamburgo e São Leopoldo com mais de 180k desabrigados. Shutterstock ID 2459042469

Mudança Climática em Números



1.2B

Pessoas que podem ser **deslocadas** por eventos relacionados ao clima até 2050

700M

Pessoas estimadas a serem deslocadas pela seca **até 2030**

560

Eventos de desastres **por ano até 2030**, uma média de 1.5 por dia

8-9 in.

Elevação do nível do mar desde 1880

40%

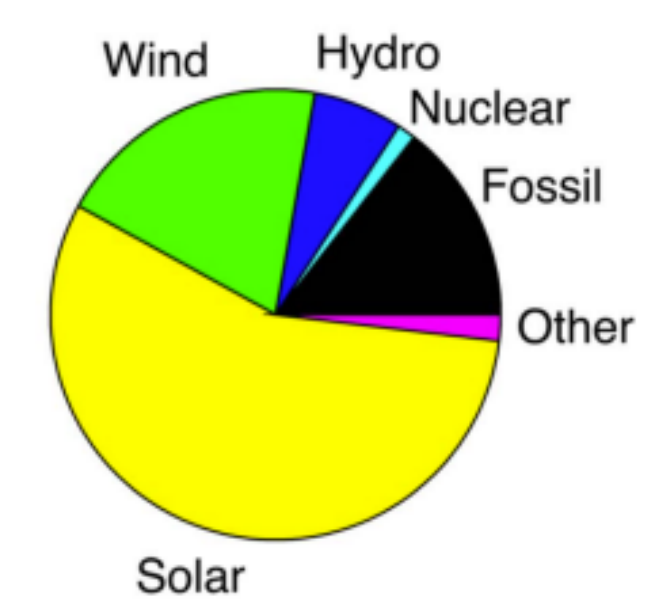
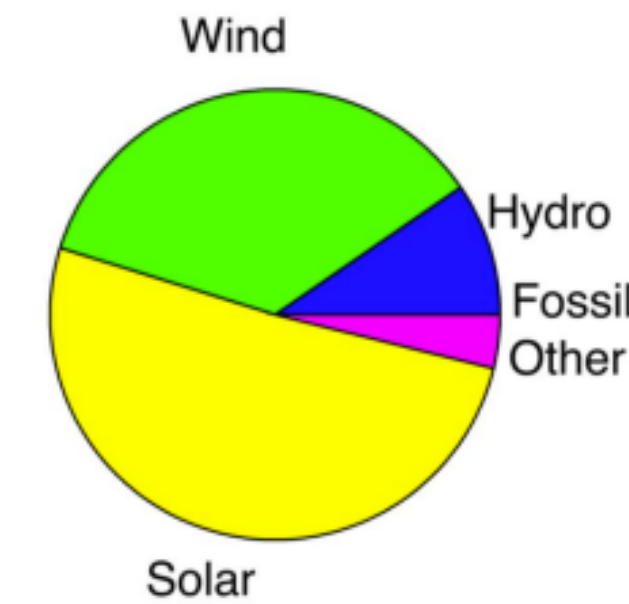
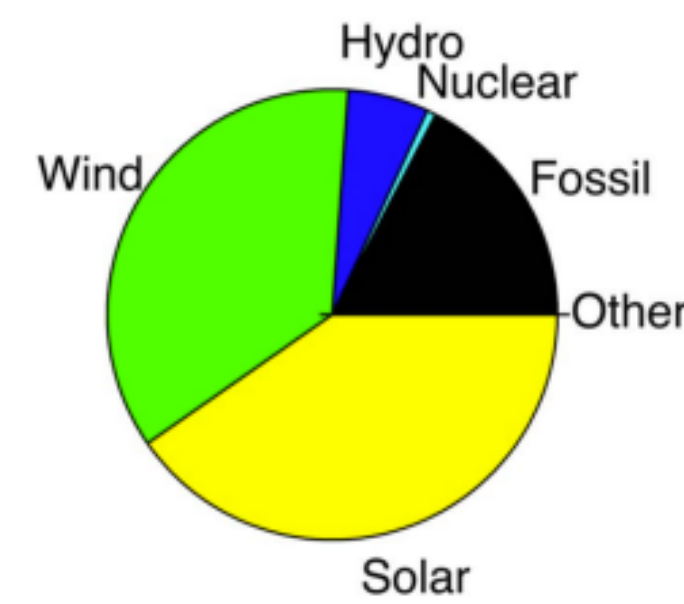
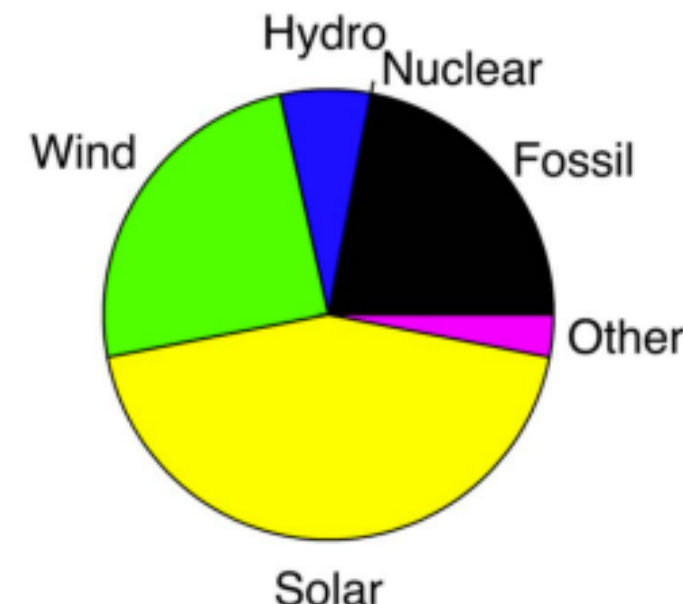
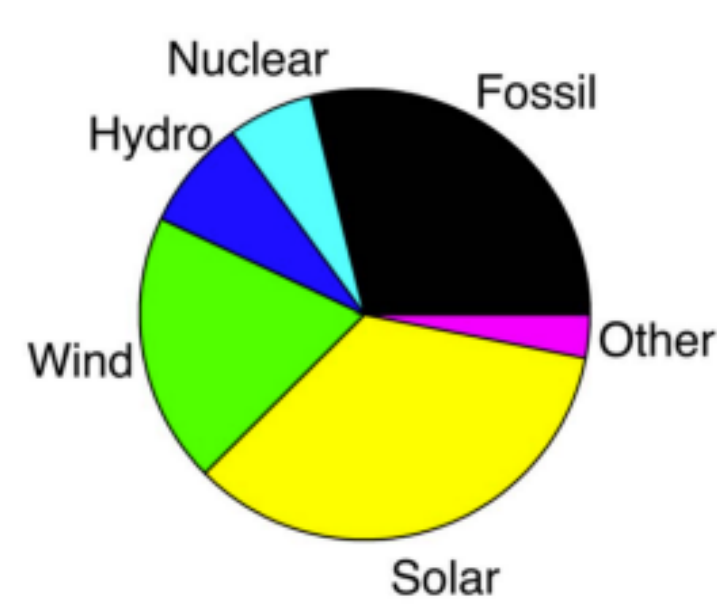
Redução na cobertura de gelo do Oceano Ártico no final do verão desde 1979

Referências

1. World Health Organization: <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>
2. The Lancet: [https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196\(22\)00090-0/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(22)00090-0/fulltext)
3. NOAA Climate.gov: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
4. NOAA: <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification>
5. World Bank: <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2018/09/20/global-waste-to-grow-by-70-percent-by-2050-unless-urgent-action-is-taken-world-bank-report>

Photo by Lucien Wanda, pexels.com

Nova Capacidade Instalada



2018

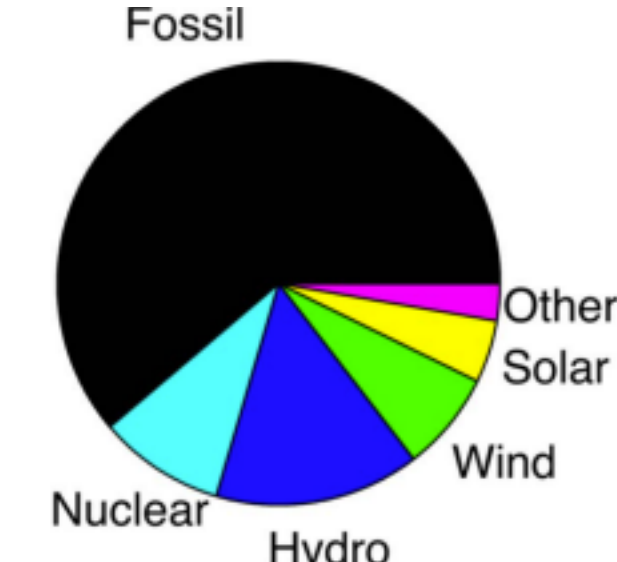
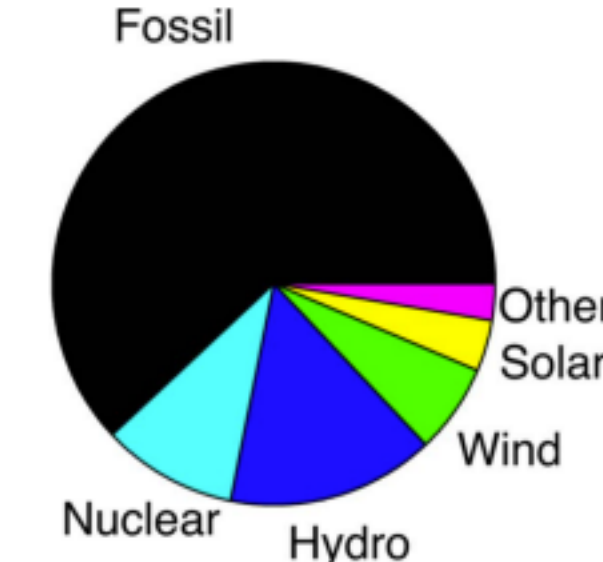
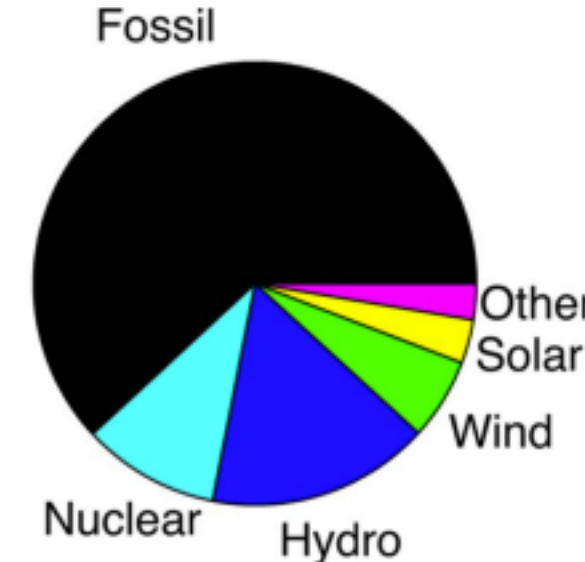
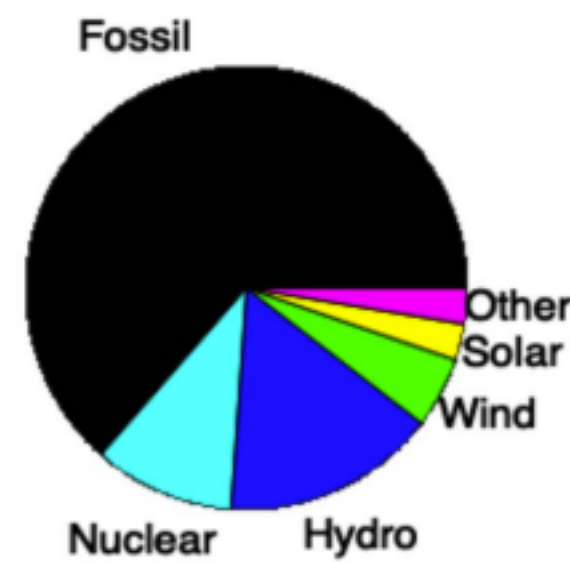
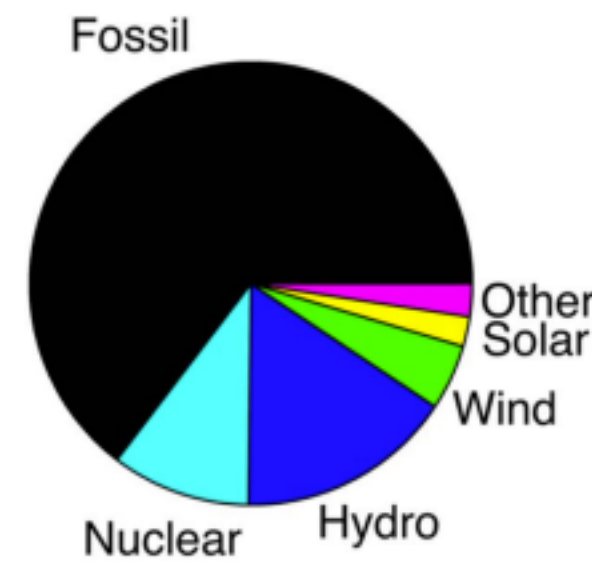
2019

2020

2021

2022

Fontes de Geração de Eletricidade



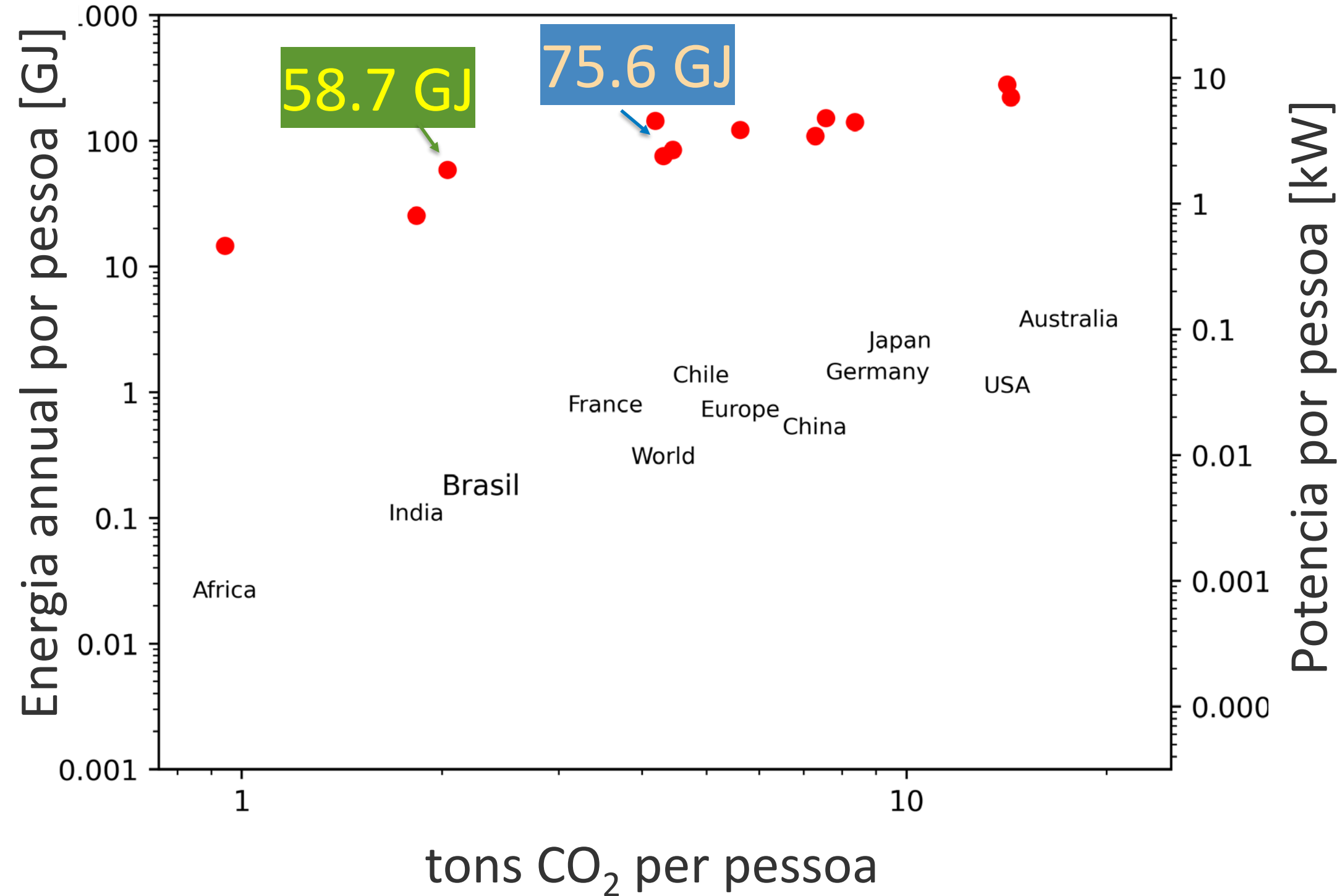
2018

2019

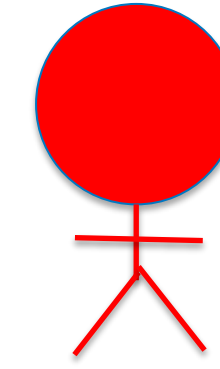
2020

2021

2022



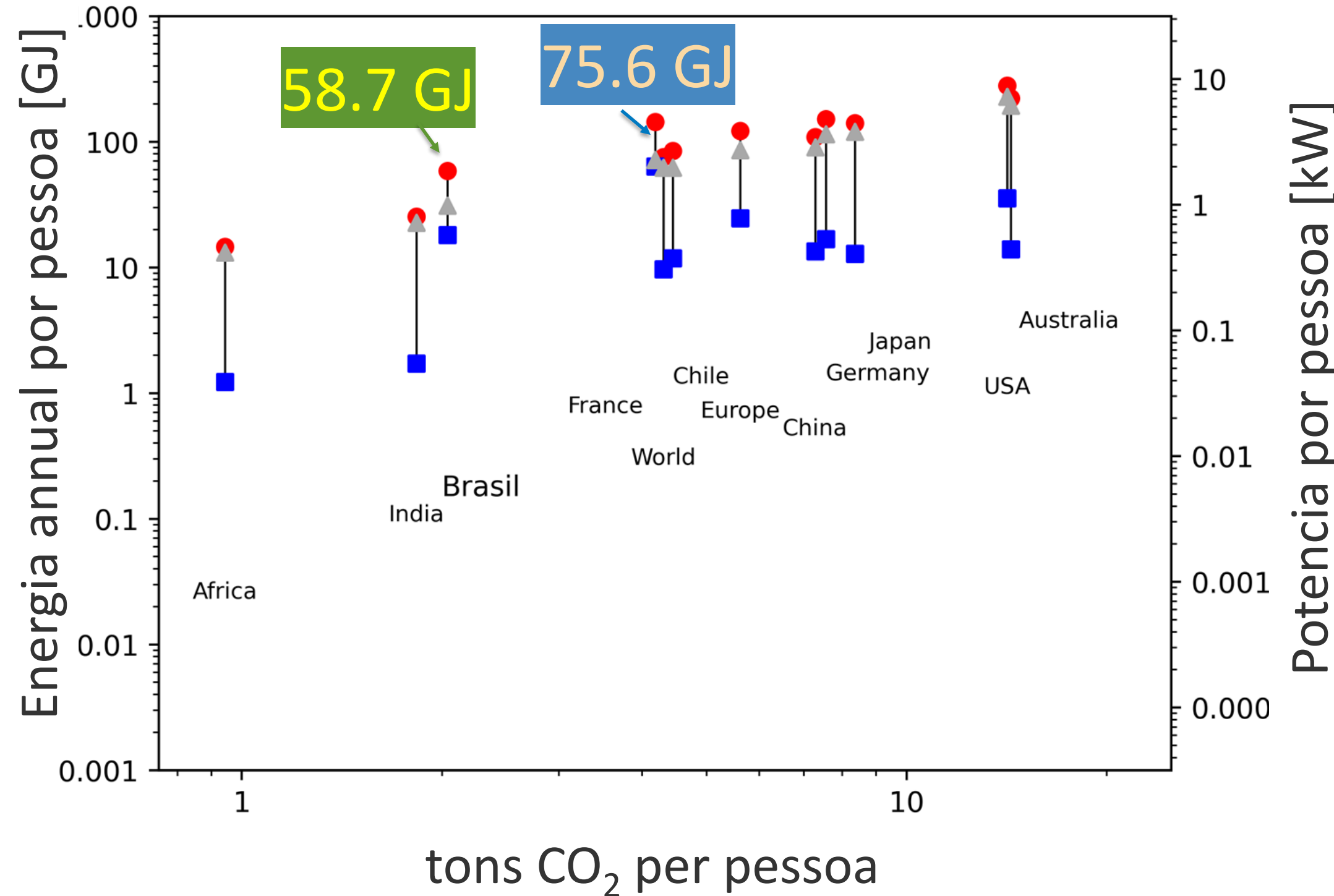
Consumo de Energia annual por pessoa [GJ]



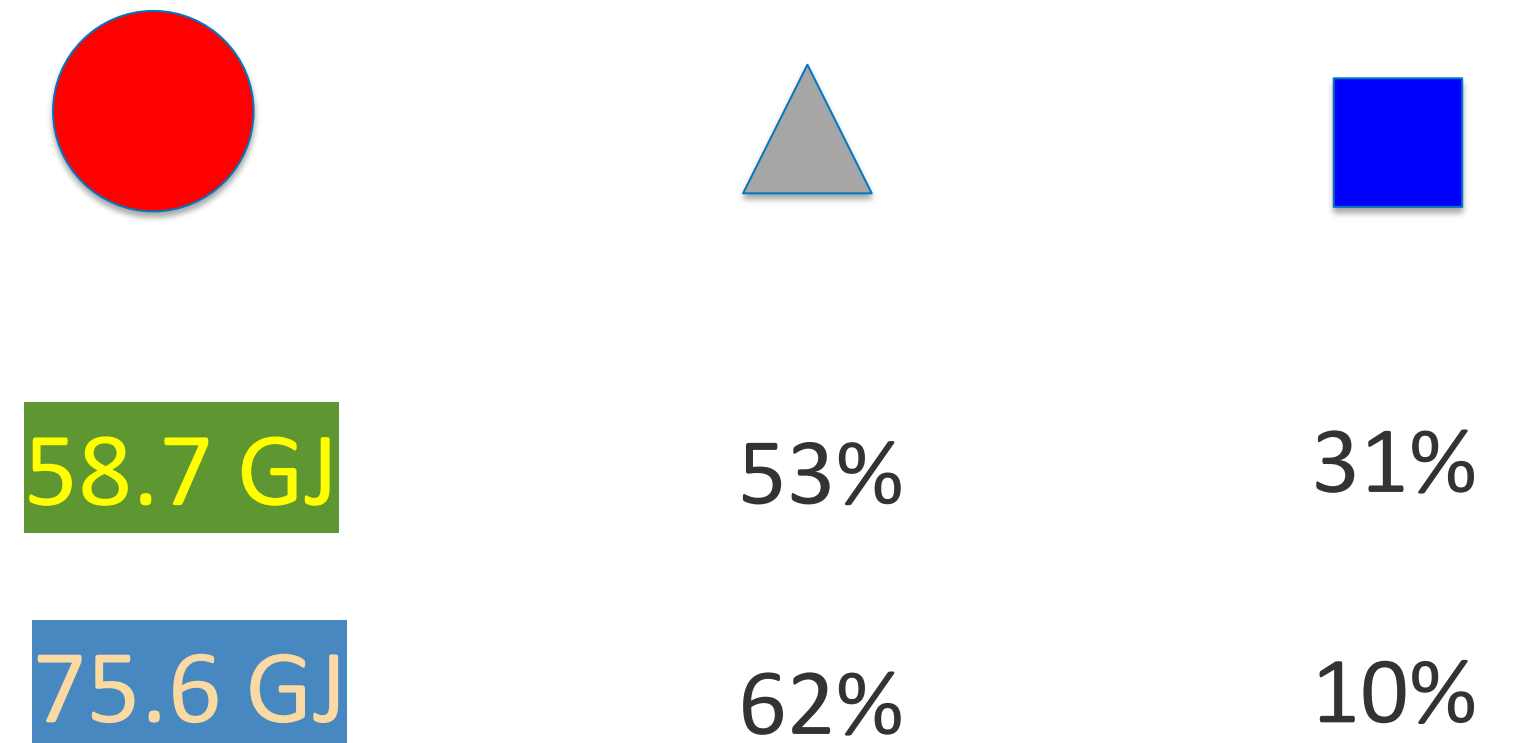
Maior desenvolvimento econômico está ligado a um **maior** consumo de energia devido à atividade industrial, melhor infraestrutura e confiabilidade, e **maior** acesso a serviços de energia modernos

À beira de uma revolução

Há **muita variação** na capacidade de energia limpa entre os países, e alguns países (como os US) que têm muita energia limpa **ainda são grandes emissores** porque a energia limpa é combinada com um alto consumo de combustíveis fósseis



Consumo ≈ Energia Fossil + Energia Limpa



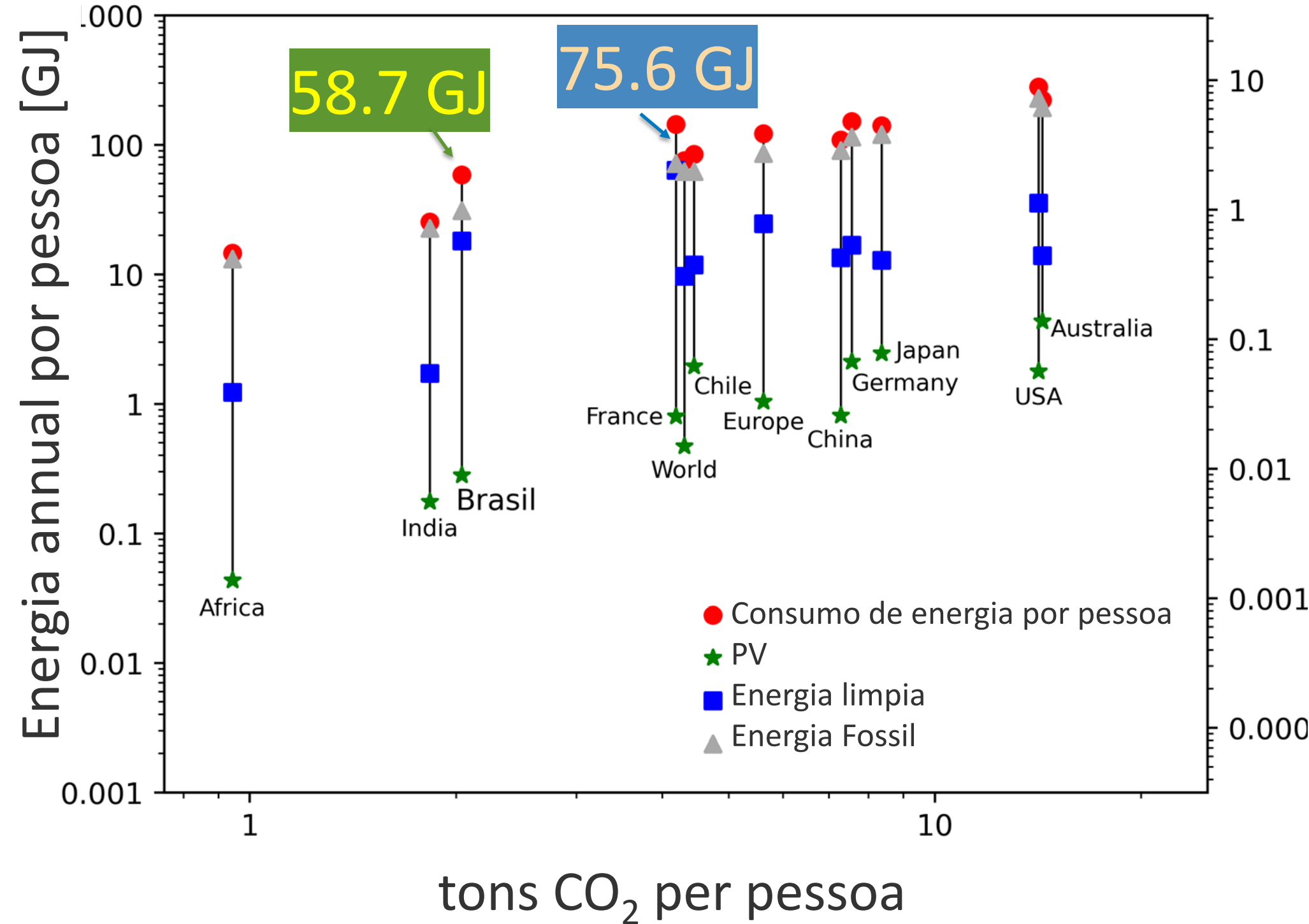
Menor Consumo fossil → Menor CO₂

Global Progress Toward Renewable Electricity: Tracking the Role of Solar (v3)
Haegel and Kurtz, 2023 <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2023.3309922>
Dados de Brasil: BP Statistical Review of World Energy, 2022

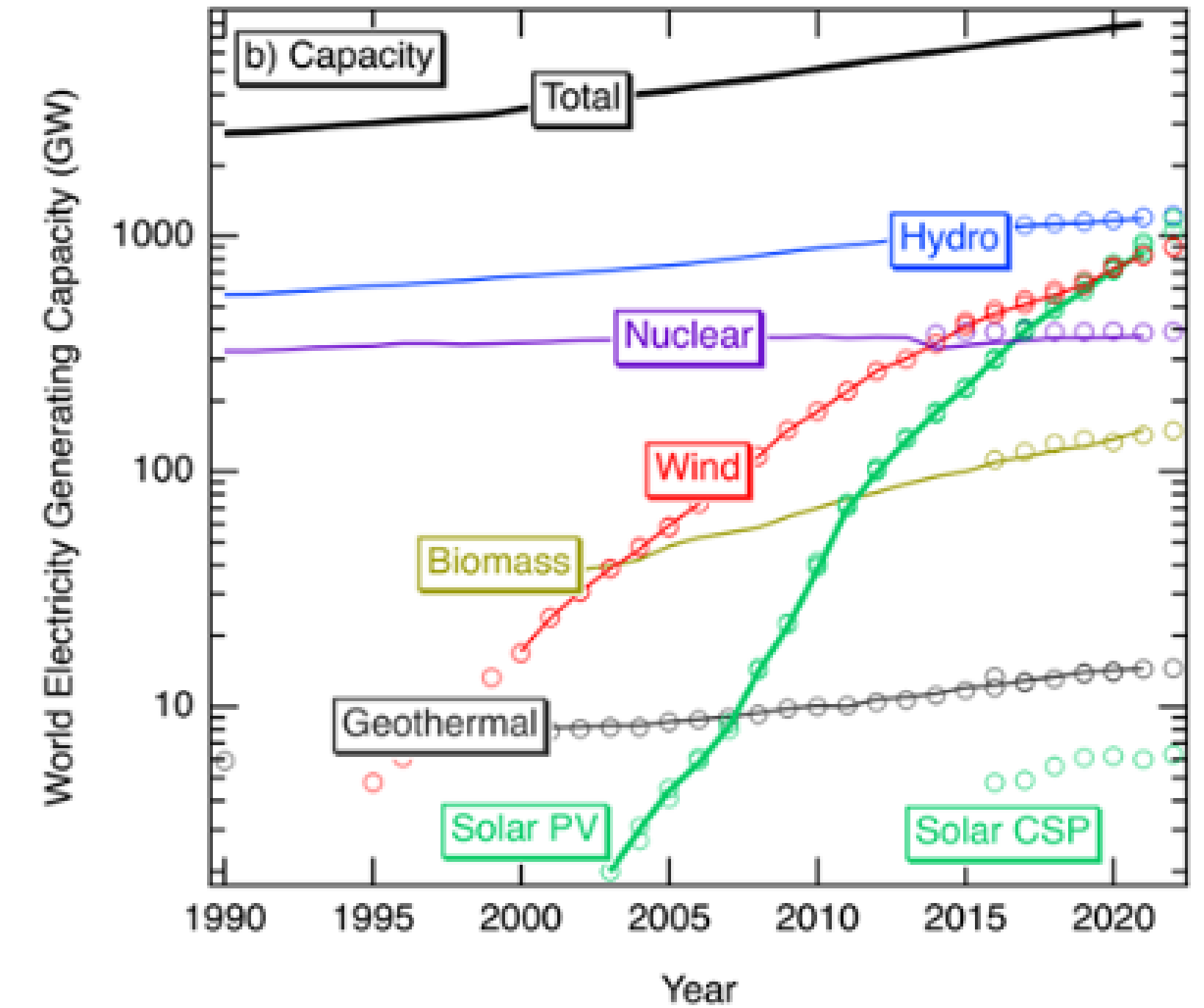
À beira de uma revolução

Brasil esta acima da meia com uma rede mais limpa.

Mas **FV** é uma proporção bastante pequena e tem muito espaço para crescimento

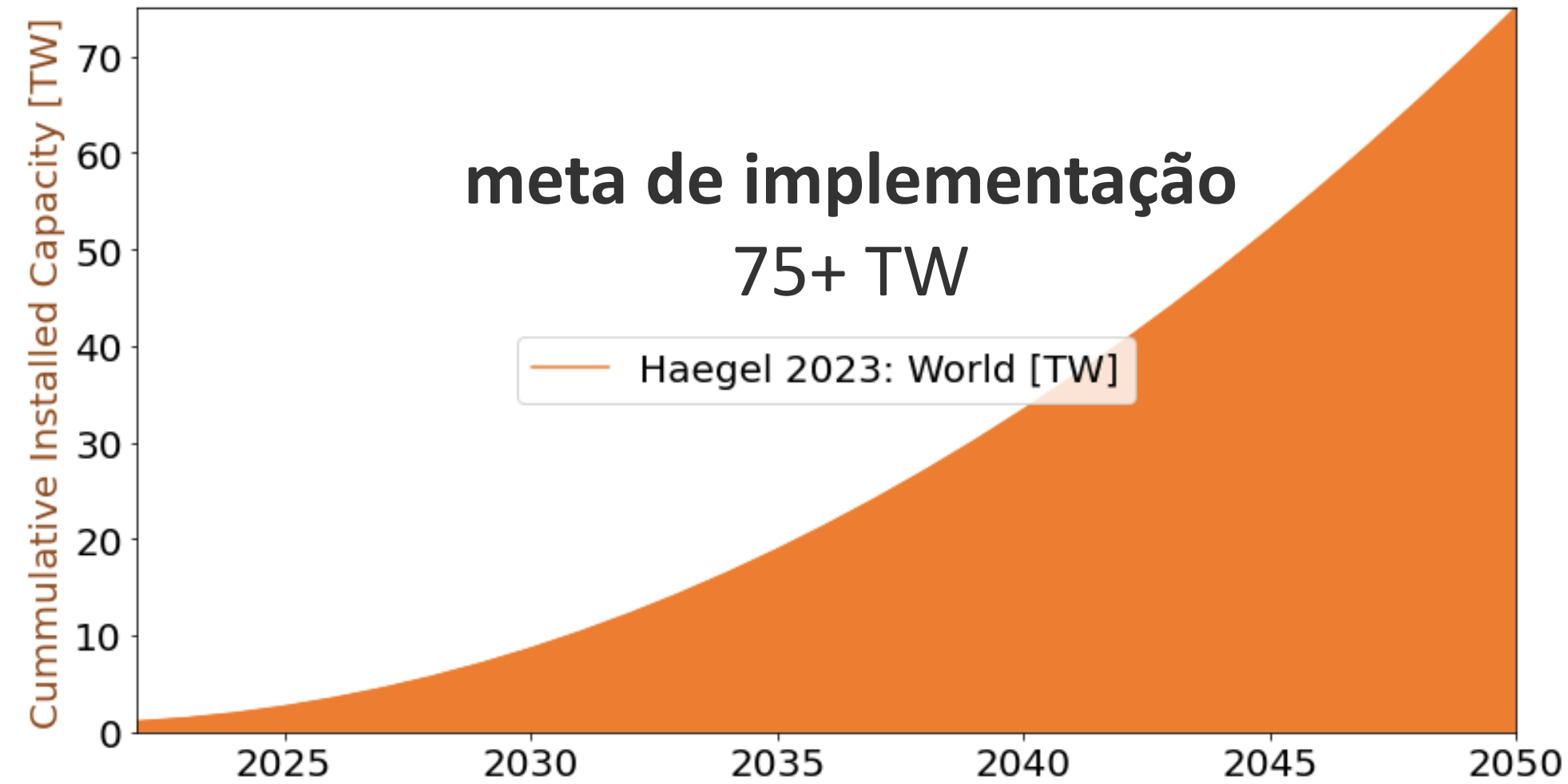


Potencia por pessoa [kW]



Global Progress Toward Renewable Electricity: Tracking the Role of Solar (v3)
 Haegel and Kurtz, 2023 <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2023.3309922>
 Dados de Brazil: BP Statistical Review of World Energy, 2022

Metas Mundiais de Descarbonização e Taxas de Implantação de Energia Fotovoltaica



2022: 1.2 TW
taxa de implementação
240 GW/yr

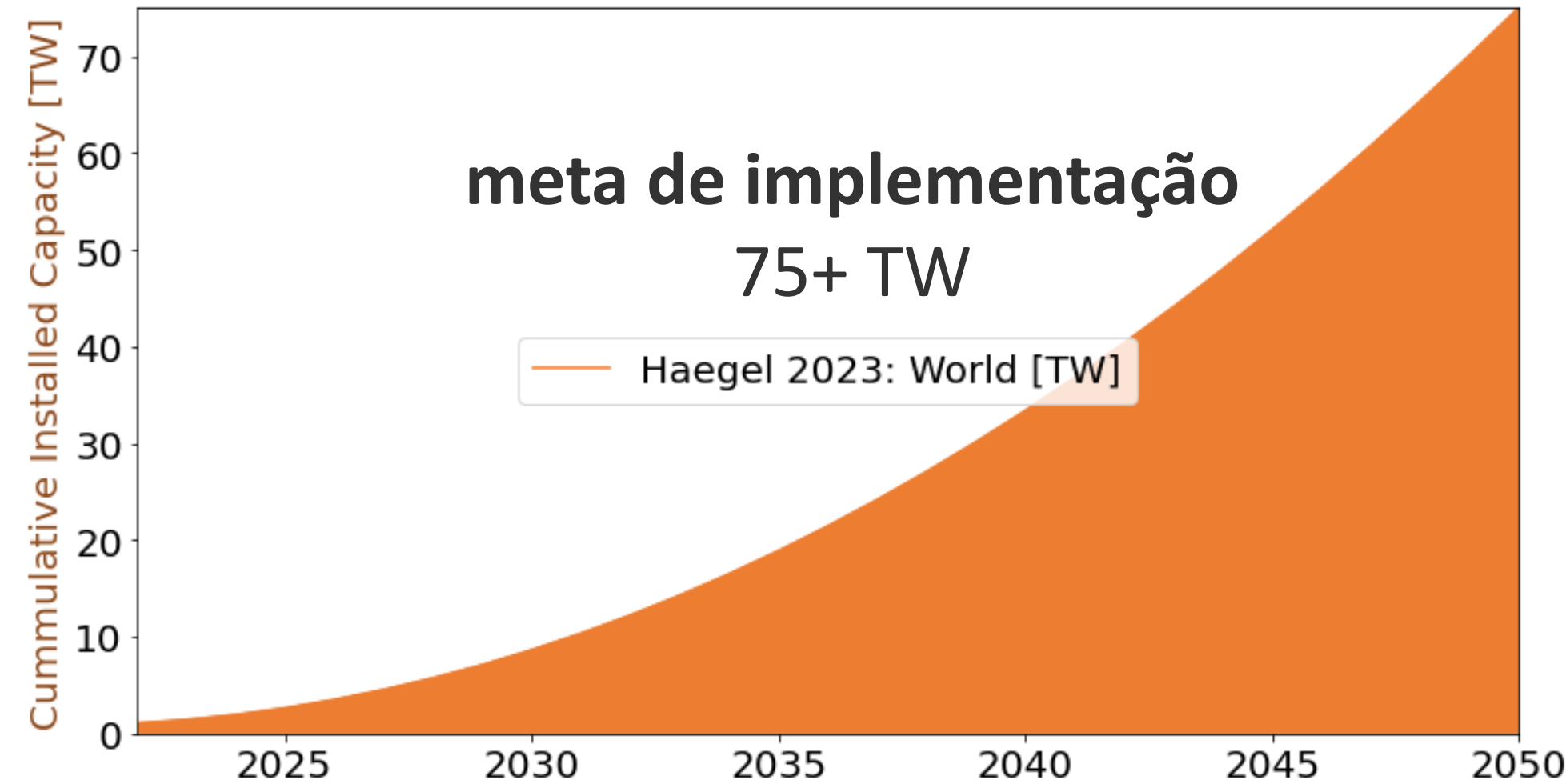
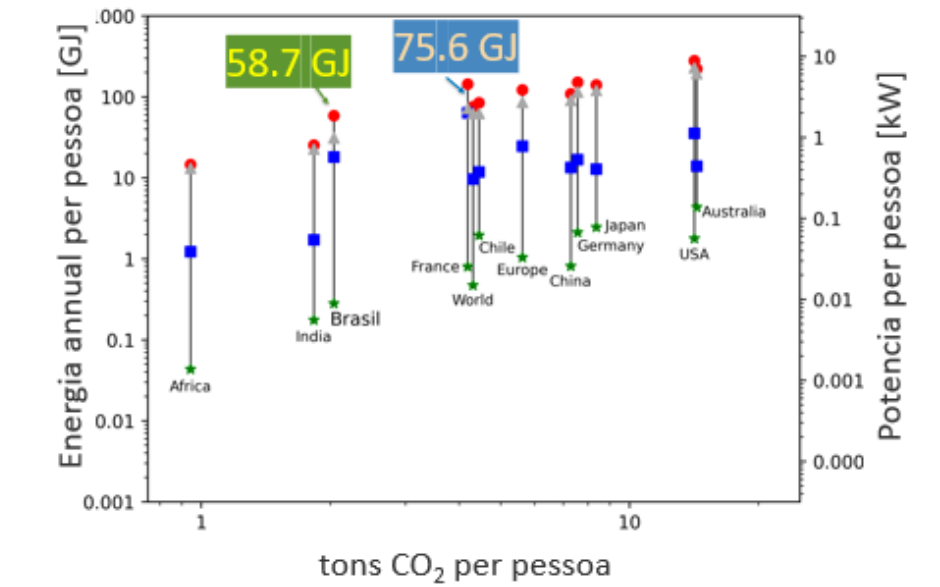
taxa de implementação projetada para 2030
3 TW/ano
Crescimento sustentado de 25% na manufatura



Terawatt Workshop

Uma iniciativa de Fraunhofer ISE, AIST e NREL
2016, 2018, 2021, 2022, 2024
~20 países, ~75 participantes

Metas Mundiais de Descarbonização e Taxas de Implantação de Energia Fotovoltaica



Problema "Fermi"

- Estimate energy use per capita (assuming future global development) **80 GJ**
- Estimate 2050 population **10 billion**
- Estimate PV capacity factor **0.20 - 0.25**
- Estimate PV fraction **60%**

Per capita:

$$80 \text{ GJ} \times 10^{10} \times 0.6 = 480 \text{ EJ}$$

$$480 \times 10^{18} / (365 \times 24 \times 3600 \times 0.2/0.25) = \mathbf{60 - 75 \text{ TW}}$$

taxa de implementação projetada para 2030
3 TW/ano

Crescimento sustentado de 25% na manufatura

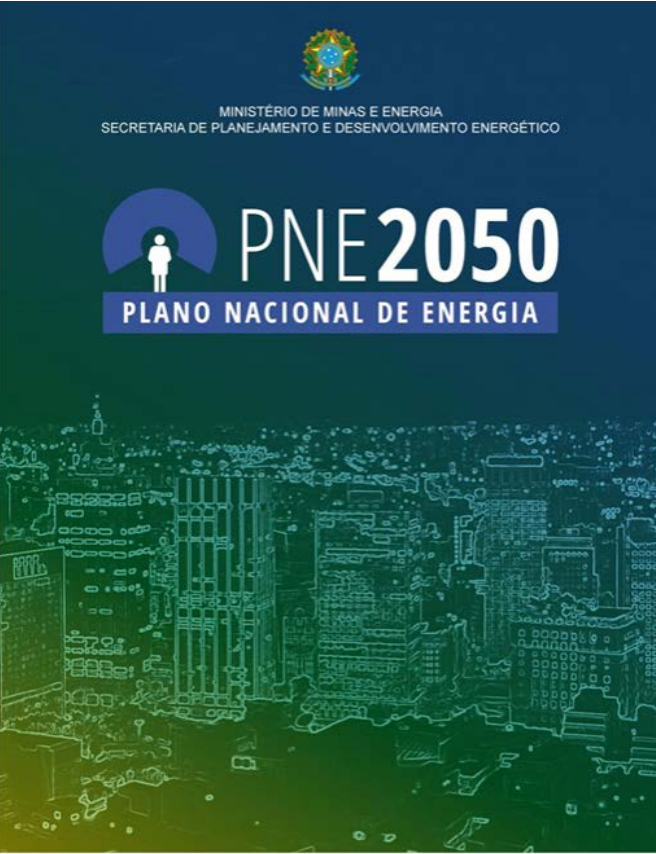
2022: 1.2 TW
taxa de implementação
240 GW/yr

Metas Mundiais e de Brasil de Descarbonização e Taxas de Implantação de Energia Fotovoltaica

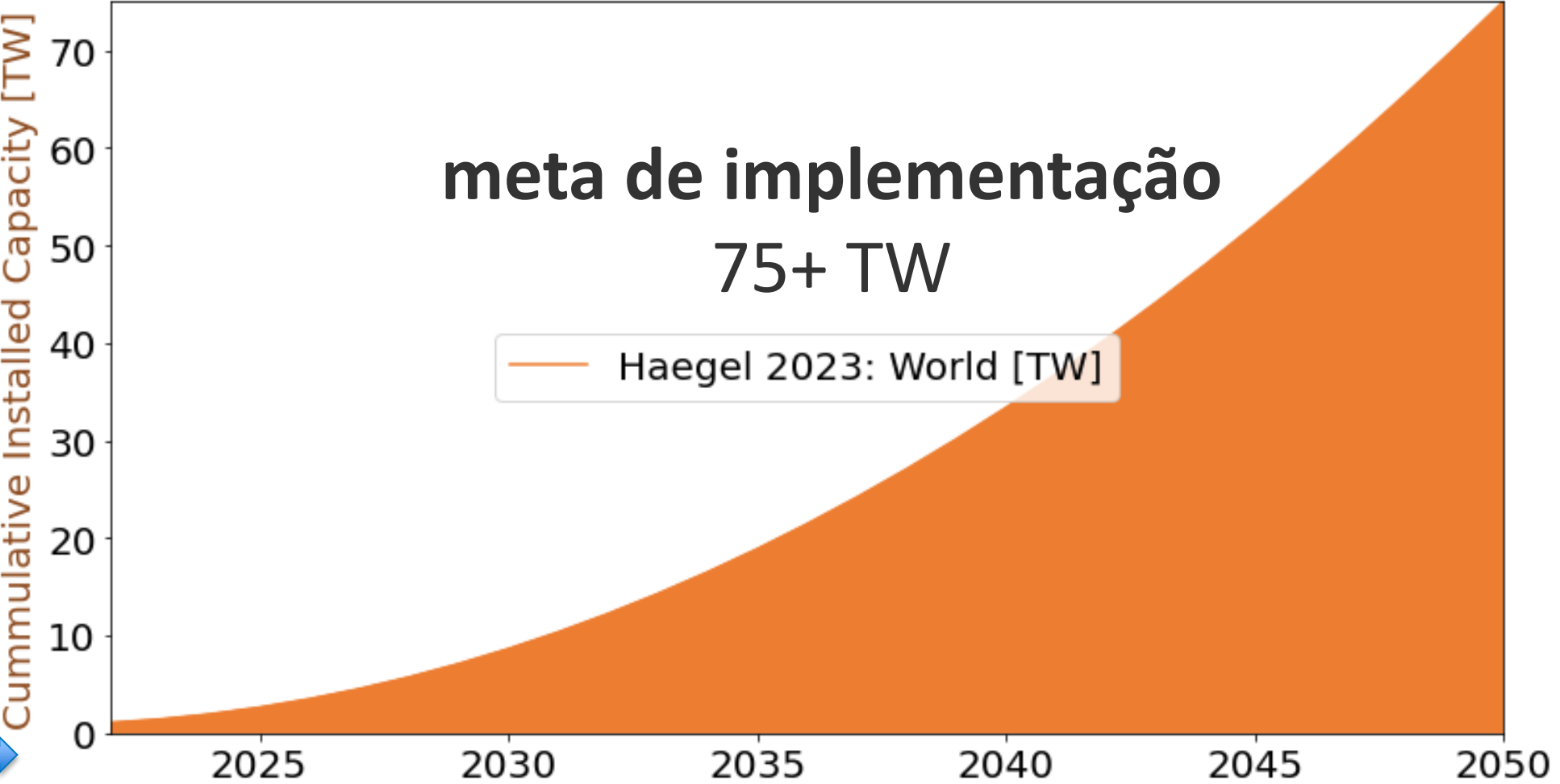
Meta do Plano Nacional de Energia 2050

81 GW

e de 38 GW em 2040



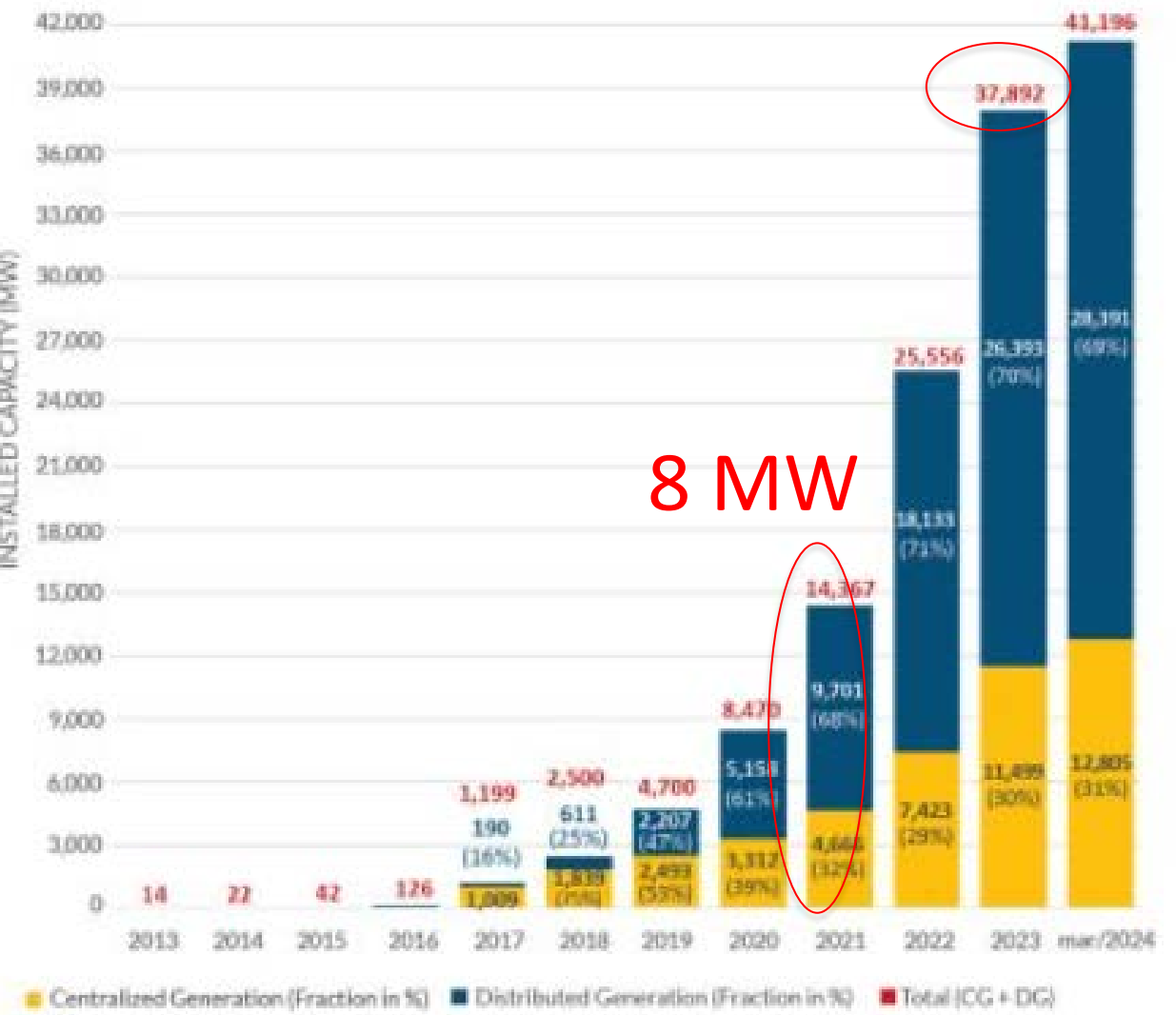
2022: 1.2 TW
 taxa de implementação
 240 GW/yr



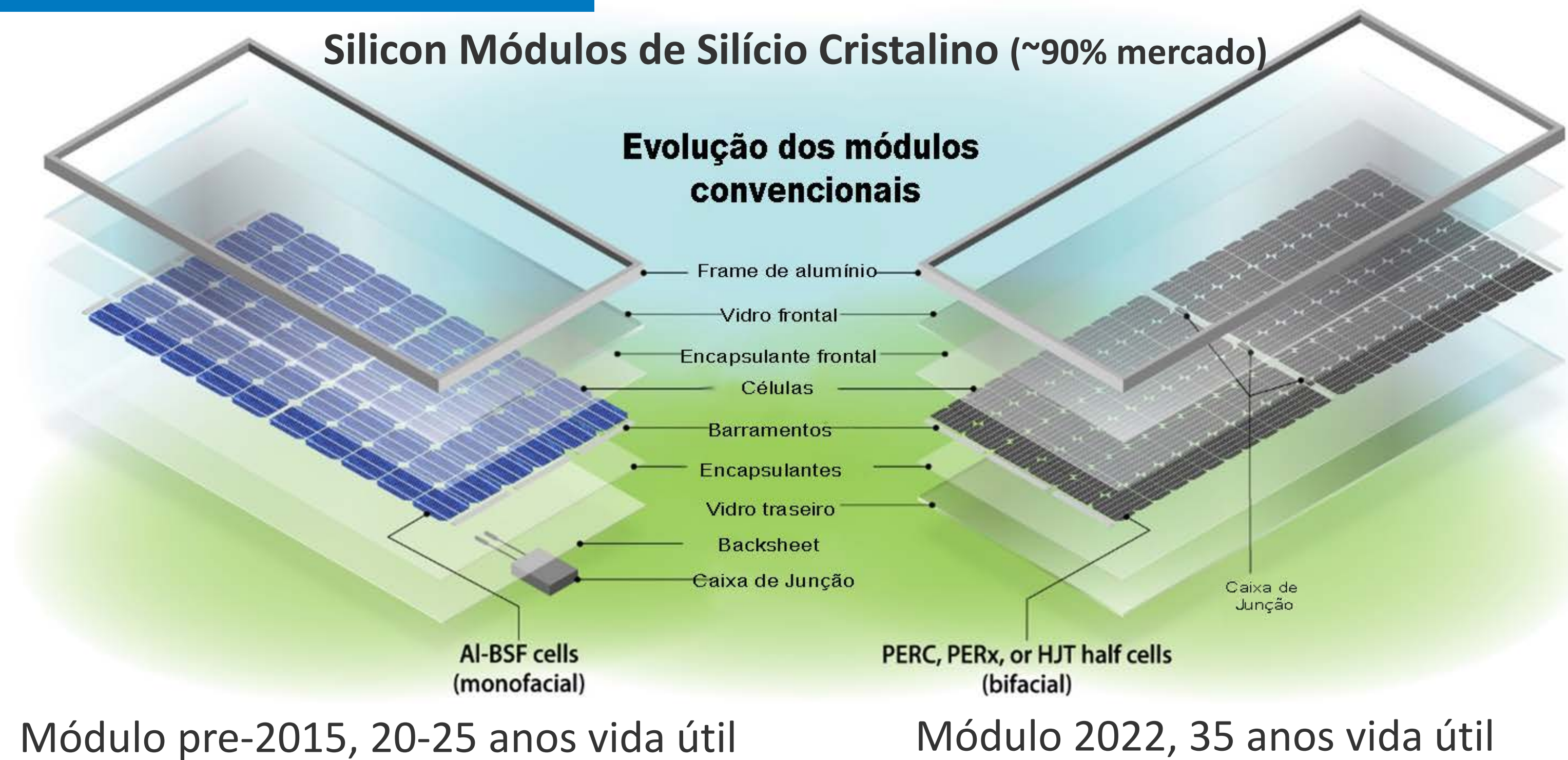
Deployment Rate Projected by 2030
 3 TW/year
 25% manufacturing sustained growth

Evolution of the Solar Photovoltaic Energy in Brazil

Source: ANEEL/ABSOLAR, 2024.



A tecnologia fotovoltaica evolui constantemente



Ovatt & Mirlitz et al, 2022. "PV in the Circular Economy, A Dynamic Framework Analyzing Technology Evolution and Reliability Impacts." *ISCIENCE*
<https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103488>.

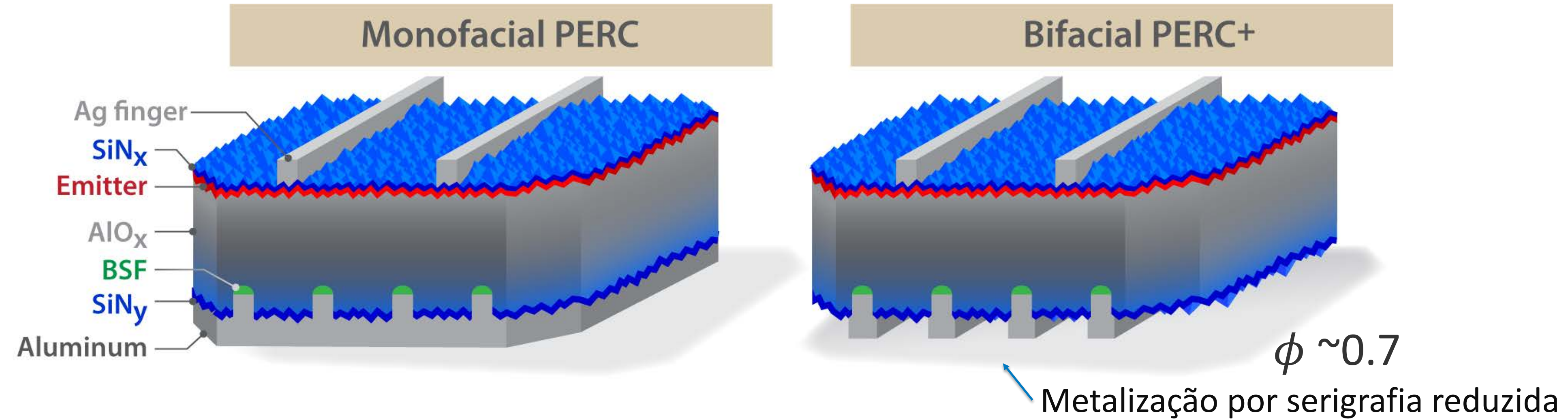
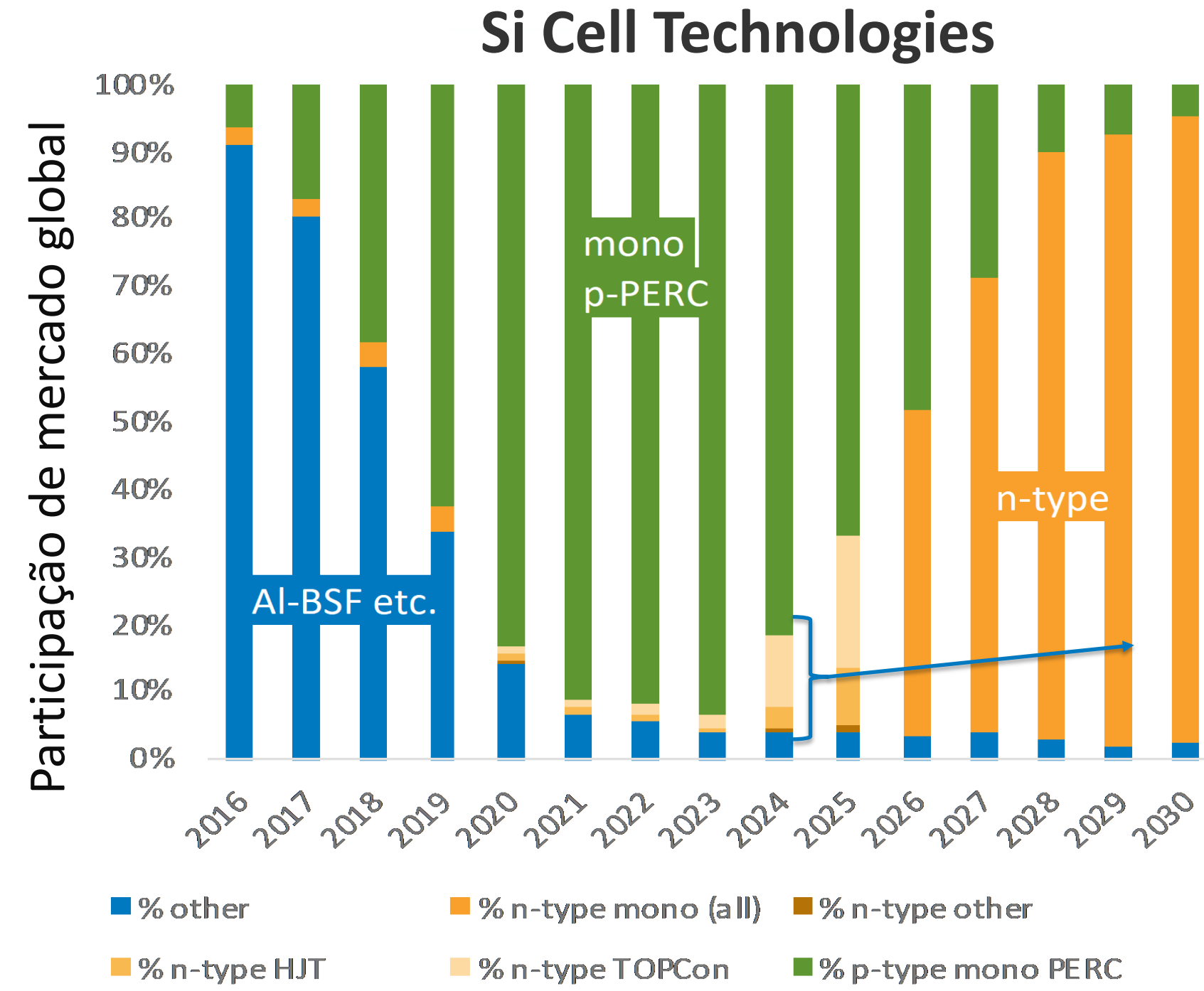
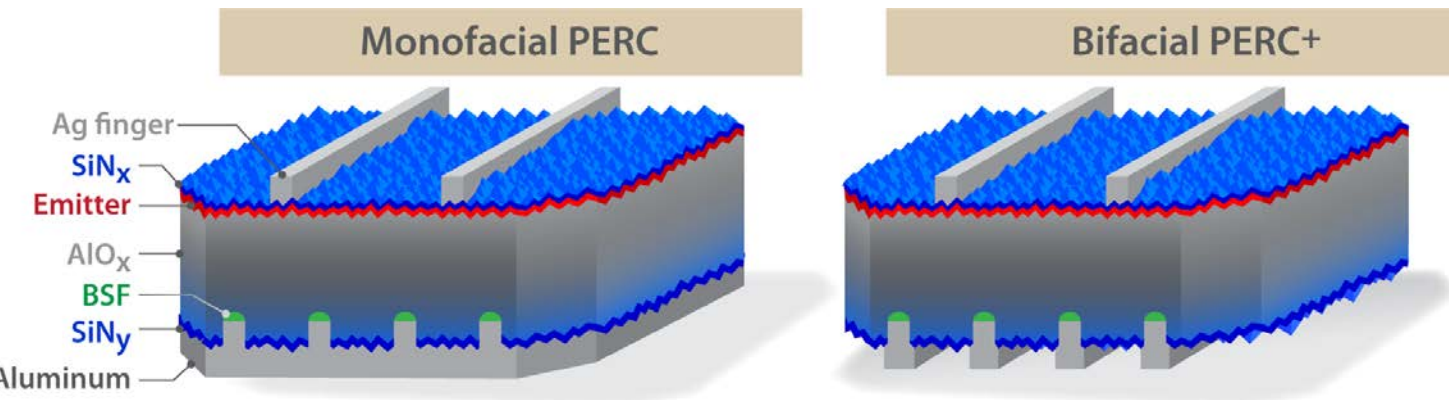


Imagem: C. Deline, PVSC 2019 Keynote "Bifacial PV System Performance: Separating Fact from Fiction" <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/74090.pdf>

Ref.: Thorsten Dullweber et al. PERC+: industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption, Prog. Photovolt: Res. Appl. (2015)

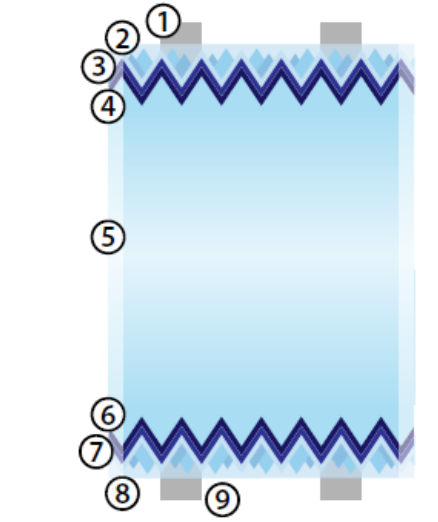
Novas Tecnologias + Crescimento Explosivo

$$\text{Module bifaciality factor } \phi = \frac{P_{Rear}}{P_{Front}}$$



HJT

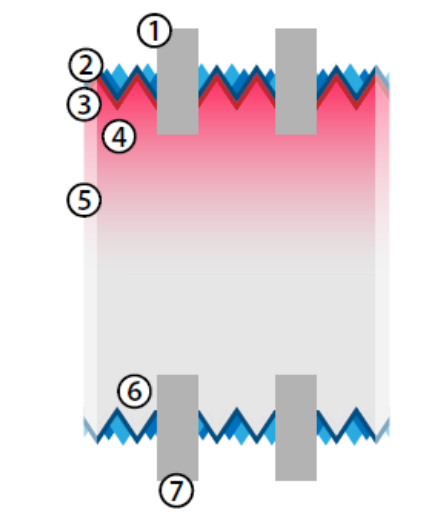
23-25% cell efficiency
 $\phi \sim 0.85 - 0.95$



1. Frontside fingers (busbars optional) comprised of low-temperature screen-printed Ag pastes or electroplated Ni/Cu/Sn/Ag
2. TCO by PVD (typically ITO for high optical transmission and low sheet resistance)
3. p^+ doping and full-area emitter formation by PECVD of a-Si:H
4. Intrinsically doped a-Si:H by PECVD
5. High lifetime n-type base wafer
6. Intrinsically doped a-Si:H by PECVD
7. n^+ doping and full-area BSF formation by PECVD of a-Si:H
8. TCO by PVD (typically ITO for high optical transmission and low sheet resistance)
9. Backside fingers (busbars optional)

TOPCon

21-23% by SP, 21-26% by PVD
 $\phi \sim 0.8$

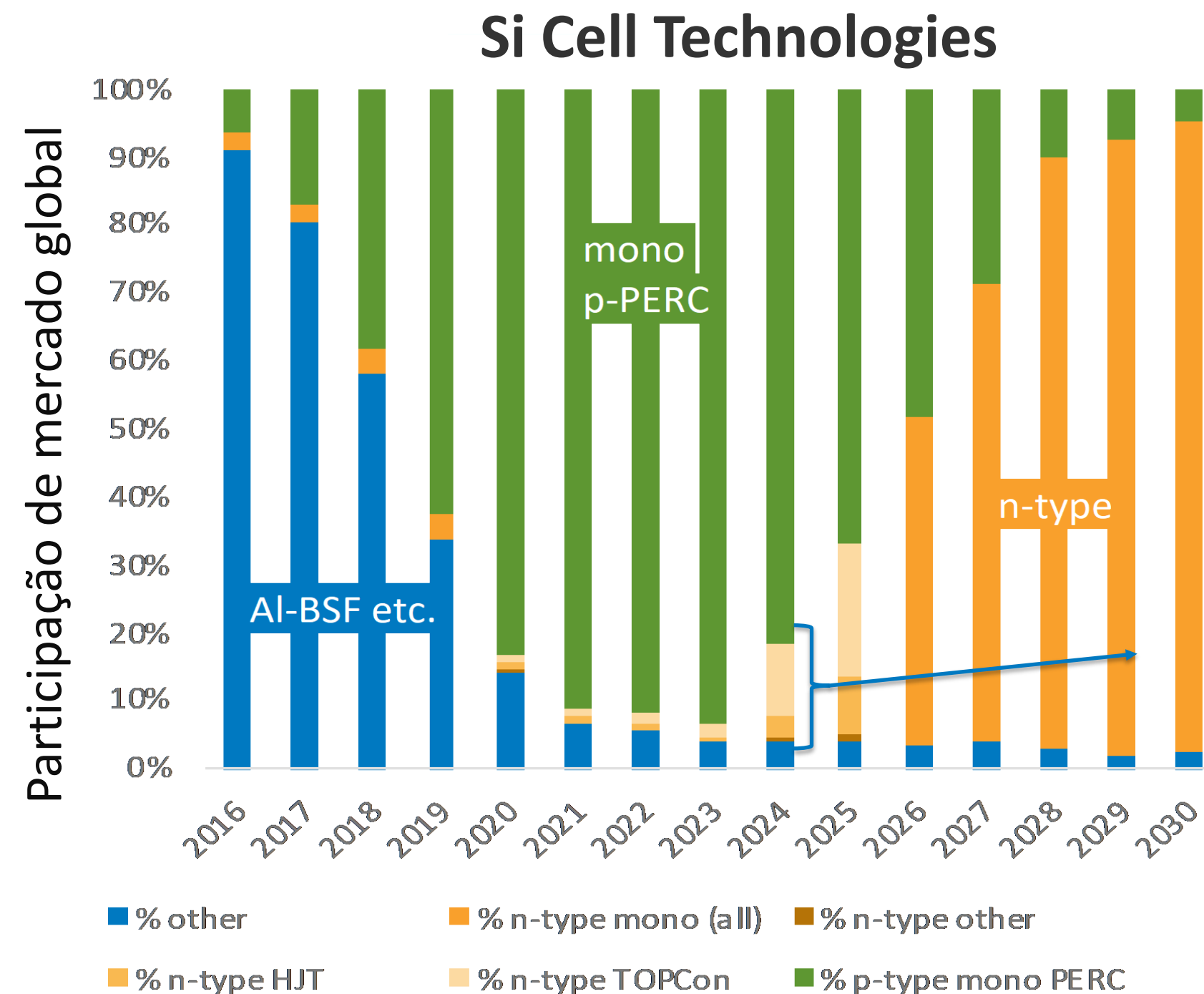


1. Ag and Al front metallization by screen-printing or PVD
2. SiN_x ARC and passivation layer by PECVD
3. PECVD or ALD of AlO_x surface passivation layer
4. p^+ doping and full-area emitter formation by ion implantation or BBr_3 diffusion
5. High lifetime n-type base wafer
6. Tunnel oxide passivated contact (TOPCon) layer formed by PECVD or LPCVD of doped a-Si or poly-Si layers
7. Ag rear metallization (sometimes full-area) by screen-printing or PVD

Thorsten Dullweber et al. PERC+: industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption, Prog. Photovolt: Res. Appl. (2015)

Jarett Zuboy. DuraMAT Tech Scouting 2022

Esperar mudanças tecnológicas um tanto disruptivas que exigirão novas fábricas a cada poucos anos



Jarett Zuboy. DuraMAT Tech Scouting 2022

Eventos atuais ilustram os benefícios do aumento da diversidade geográfica para novas plantas e do planejamento sustentável

Políticas (US):

- Uyghur Forced Labor Prevention Act
- Inflation Reduction Act

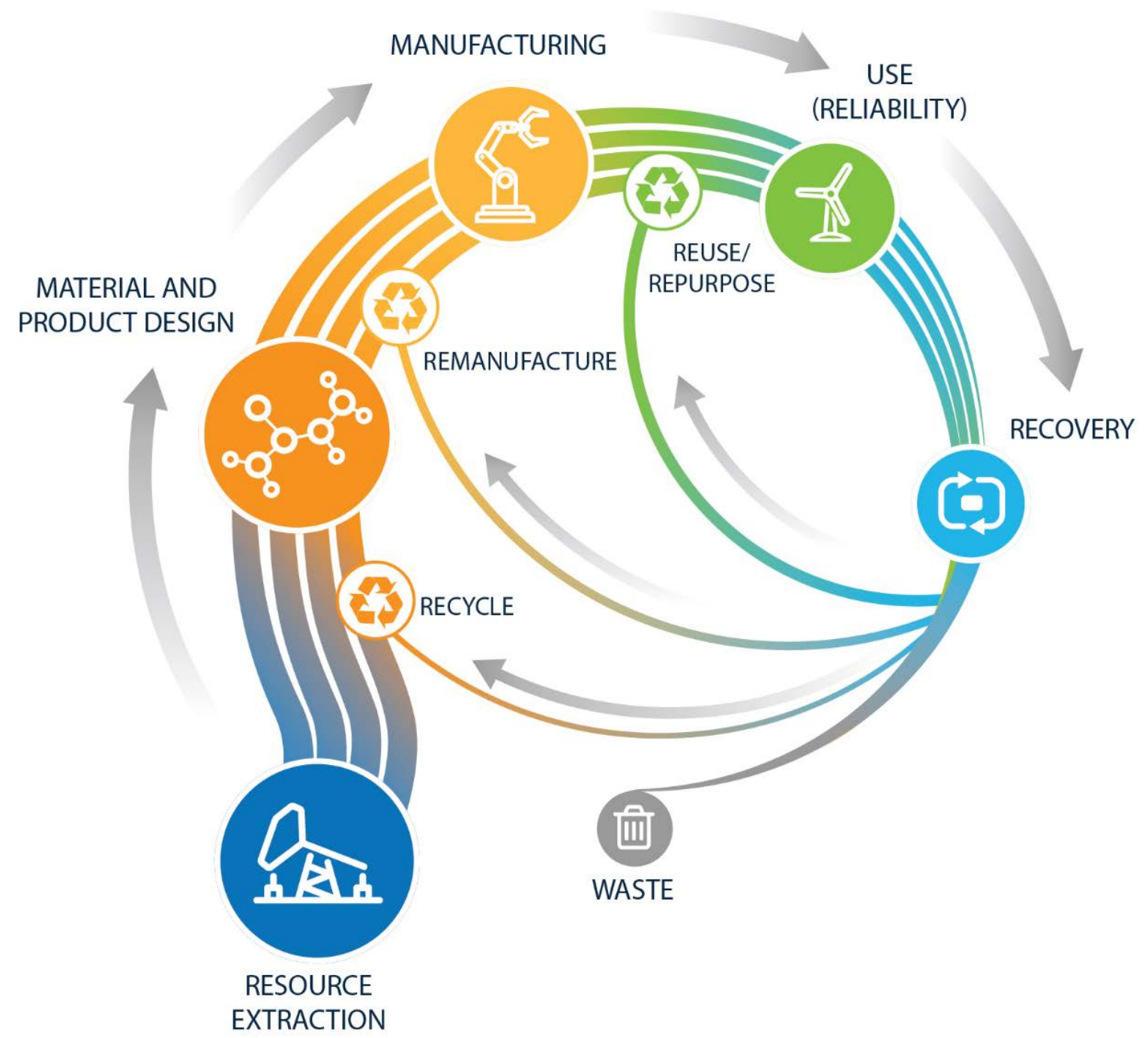
Dinâmica de Mercado

- Escassez de suprimentos, i.e. choques de preço do polissilício

Diversidade, Equidade, Inclusão e Sustentabilidade

- Redução dos Impactos Ambientais e Sociais Negativos Aumentados, i.e. trabalho forçado na produção de polissilício, mineração de areia mal regulamentada/ ilegal

Como conseguir um crescimento sustentável?



Economia Circular

$$CI = 1 - \frac{V + W}{2M + \sum_x \frac{W_{F(x)} - W_{R(x)}}{2}}$$

Materials Virgens (V) Resíduos (W)
 Massa do produto (2M) resíduos da matéria-prima e fabricação (W_{F(x)}) resíduos do processo de reciclagem (W_{R(x)})



A circularidade não é suficiente

Estratégias de Economia Circular Adaptadas para Energia Fotovoltaica

	Estratégias R	Descrição geral	Proposta Específica para PV
Descarbonização em primeiro lugar	R*: Reliability	Fazer produtos confiáveis	Fabricar módulos de alta qualidade com longa durabilidade; Compartilhamento; Normas; teste acelerados e de campo; transparência da Lista de Materiais (BOM)
	R0: Refuse	Recusar combustíveis fósseis e materiais com alta intensidade de carbono	Decarbonize First; Refuse Virgin and Conflict Materials
	R1: Rethink	Designo e integração do sistema para rendimento energético ao longo do tempo	Sistemas fotovoltaicos de alto rendimento energético; PV Integrado; Preparação para o futuro/compatibilidade retroativa; Projetar para Reparação e Confiabilidade
Maximizar a Energia	R2: Reduce	Reduzir energia, materiais e emissão de carbono	Reduzir o uso de materiais/Wp; Substituição de materiais Aumentar o rendimento da fabricação; Descarbonizar a fabricação
	R3: Reuse	Reutilizar se em boas condições	Merchant tail; Revenda no mercado secundário
	R4: Repair	Reparo e manutenção para vida útil prolongada	Reparo no local de módulos e componentes
	R5: Refurbish	Restaurar antigos para funcionalidade atualizada	Desmontar e transportar módulos para reparos; Substituir módulos danificados por tempestades no local mesmo
	R6: Remanufacture	Usar peças em novos produtos para a mesma função	Desmontar, substituir células, relaminar
Transformar resíduos em matéria-prima	R7: Repurpose	Usar peças em novos produtos para funções diferentes	Reenergizar o sistema com novos componentes
	R8: Recycle	Processar materiais com alta ou baixa qualidade	Separar módulos e componentes, recuperar materiais
	R9: Remine	Mineração de aterros	Extrair materiais que vai entrar aos aterros, refinar
	R10: Recover	Recuperação de energia através da incineração	Queimar materiais componentes para geração de energia

PV ICE

nrel.gov/pv/pv-ice-tool.html

Métricas



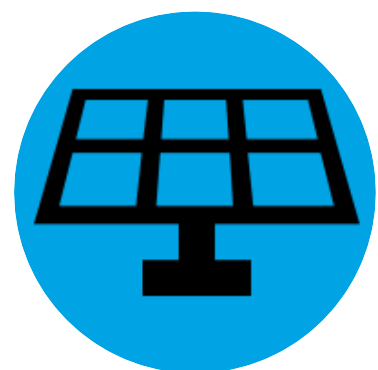
Materiais Virgens

Reduzir a extração de materiais virgens



Materiais no Fim de Vida

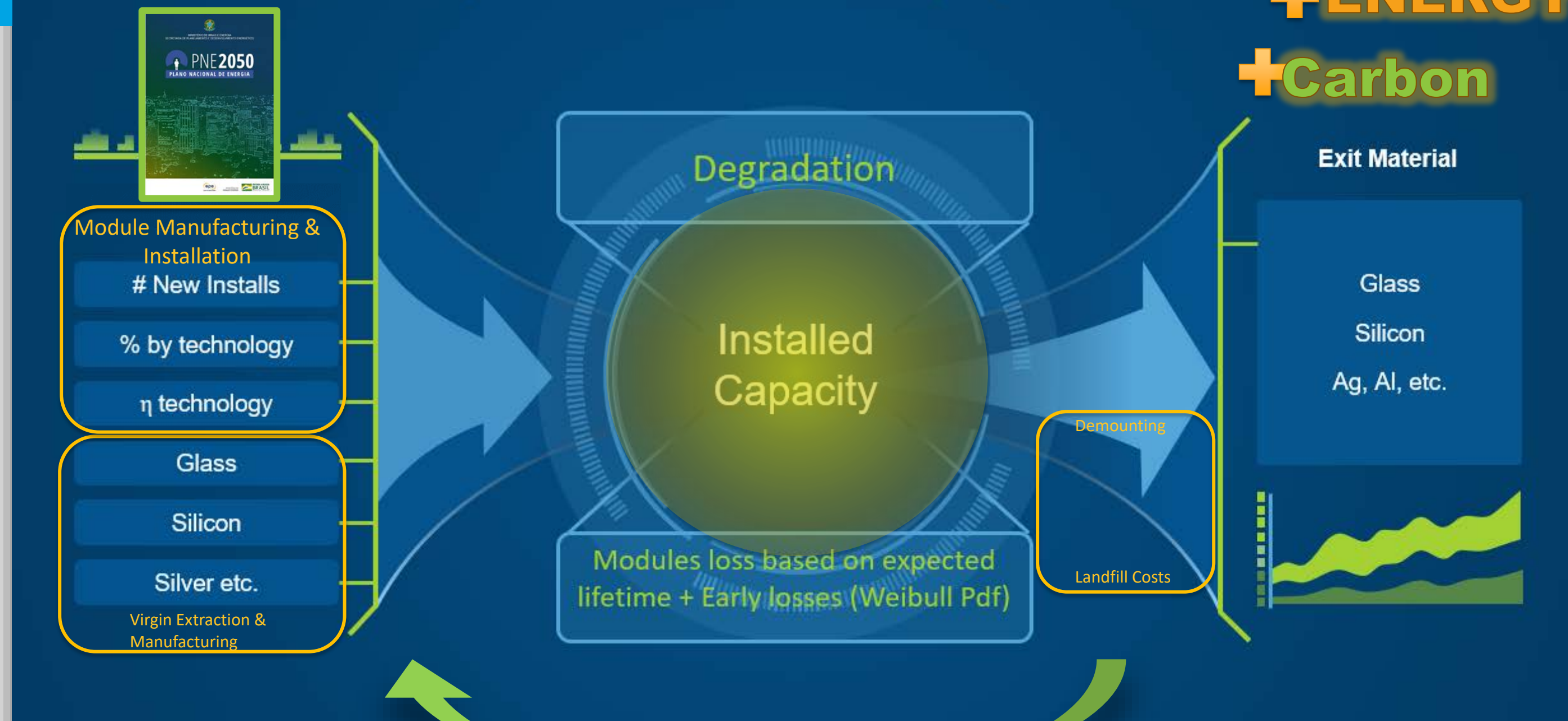
Reduzir resíduos ao longo do ciclo de vida do PV



Capacidade Instalada

Maintain PV Manter a capacidade de PV para alcançar à transição energética

Materials and Systems Flow Concept (Mass Flow)



REUSE (RESELL & MERCHANT TAIL), REPAIR, REMANUFACTURE, RECYCLE

Métricas



Energia Entrante

Minimizar a demanda de energia dos processos e materiais



Energia Saínte

Maximizar o rendimento do FV para a transição energética



Balanço Energético

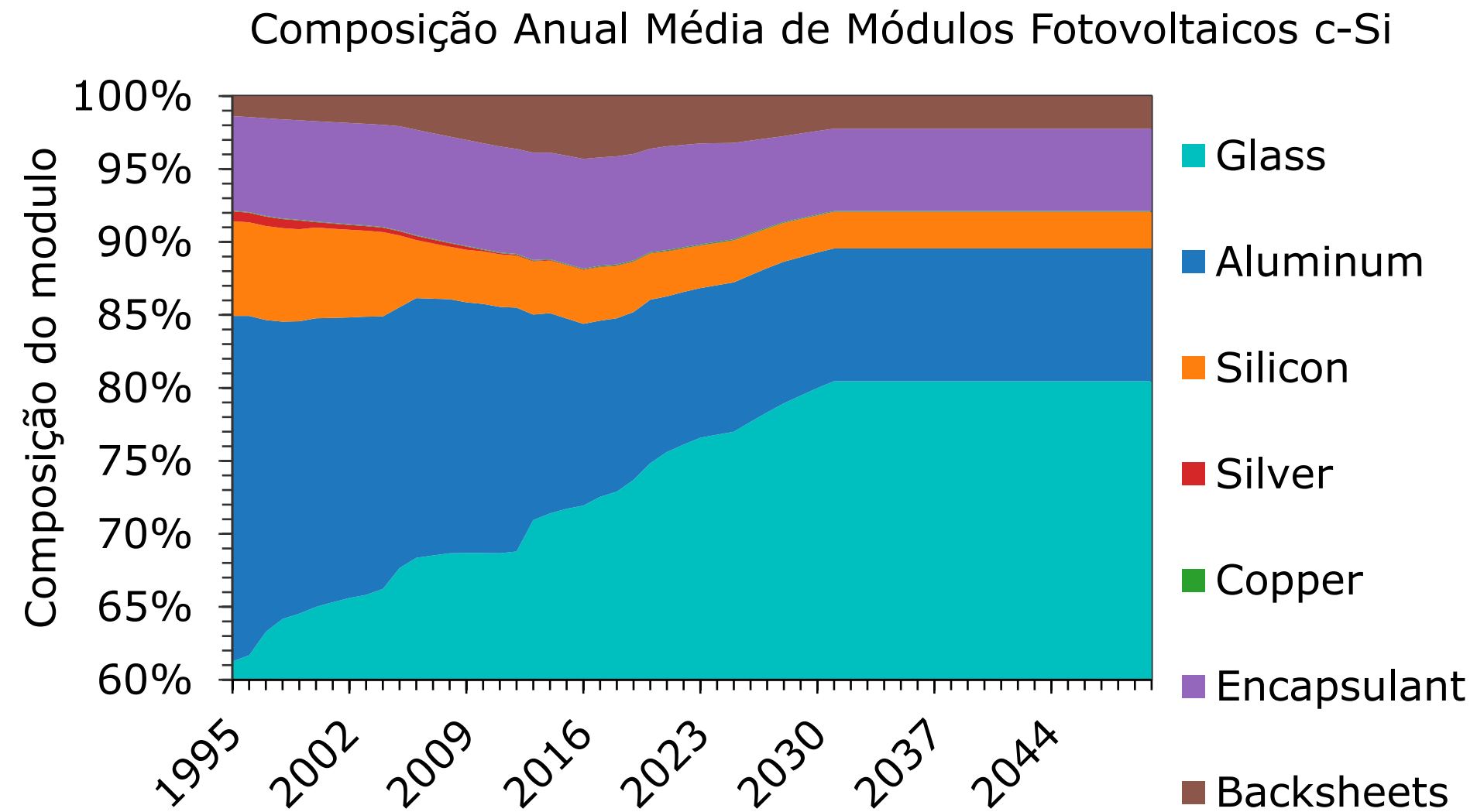
Maximizar EROI, EPBT, Net Energ



Segurança da Cadeia de Suprimentos

Aquisição justa e confiável de materiais

Particularidades do PV



Considerando o conteúdo da Solda, plástico e vidro, PV está mais próximo dos resíduos de construção civil do que e-waste

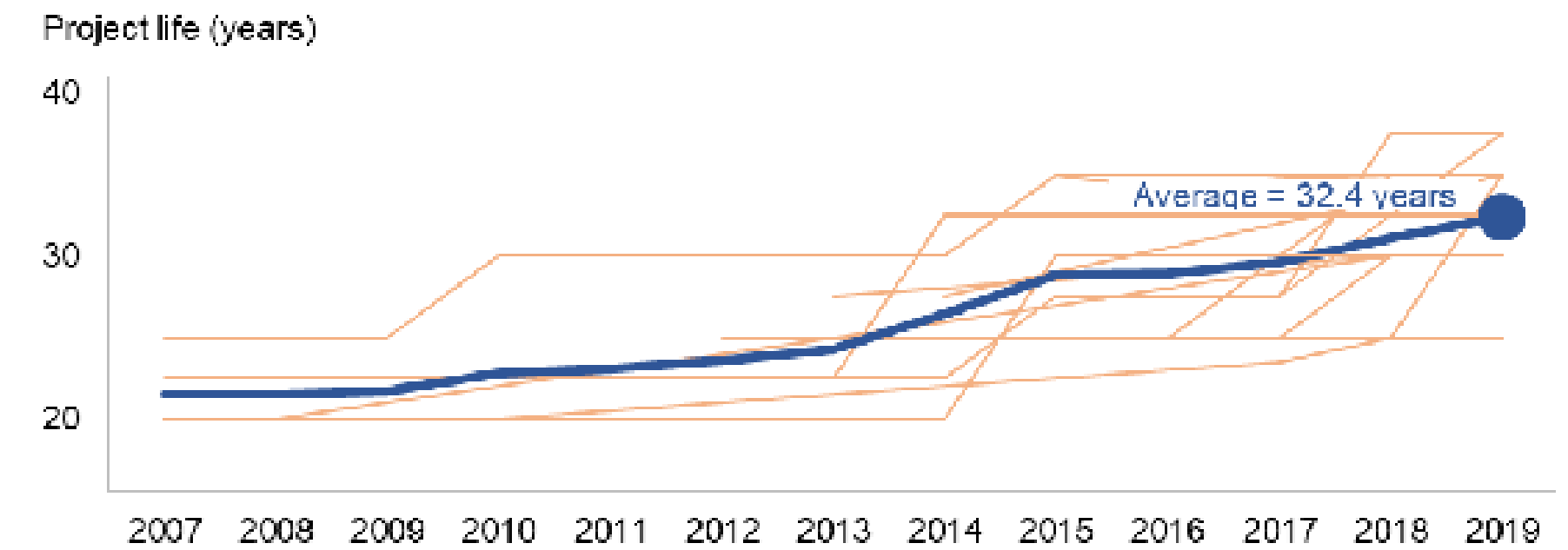
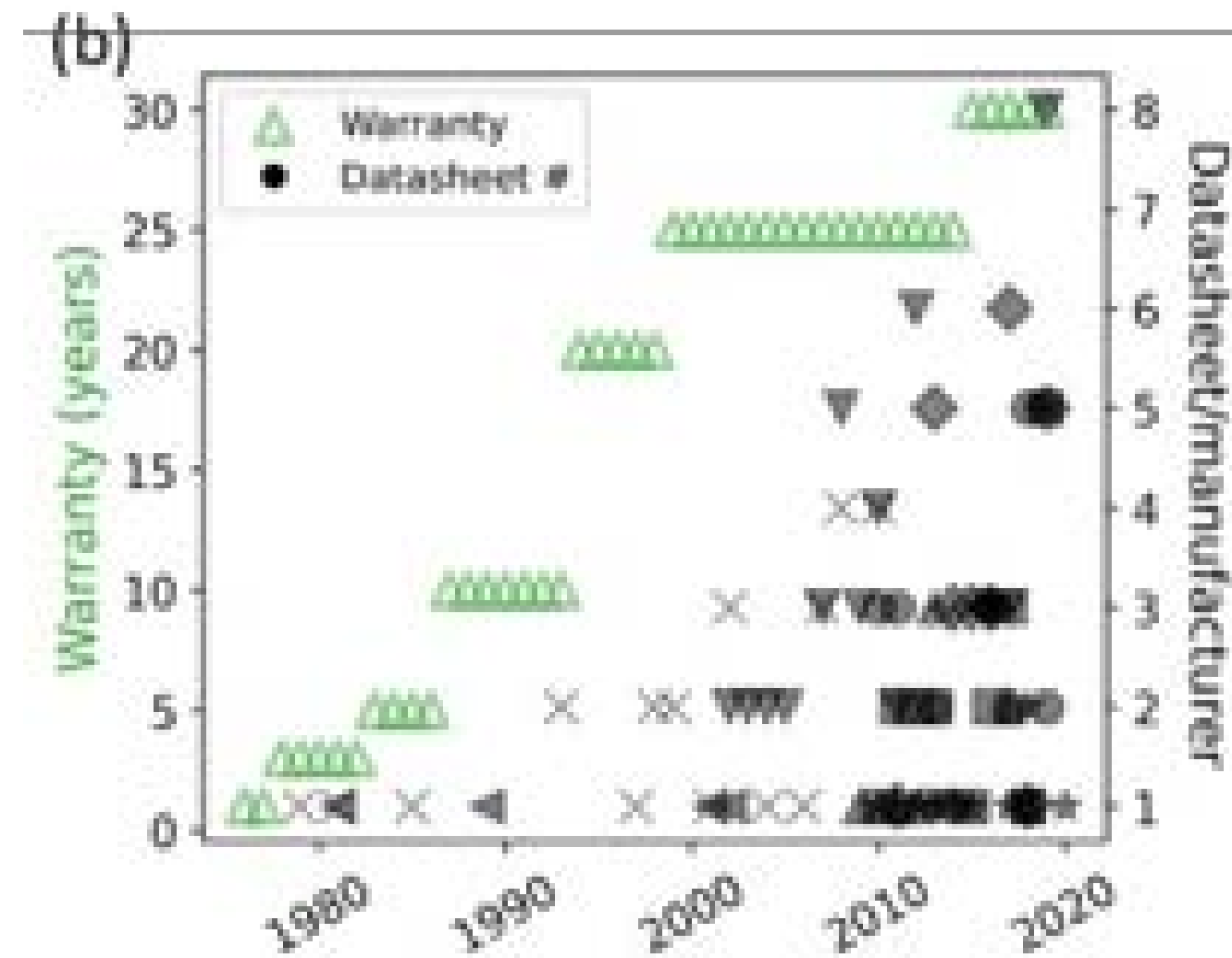


Figure 2. Project Life Expectations for Utility-Scale PV, over Time

32 Years anos vida útil
-0.7% taxa de degradação

¹ PV ICE Baselines <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103488>.

²D. Jordan, Photovoltaic Module Reliability for the TW Age, 2022, [10.1088/2516-1083/ac6111](https://doi.org/10.1088/2516-1083/ac6111)

³ Wiser, LBL, 2020

⁴D. Jordan PV field reliability status—Analysis of 100 000 solar systems, 2020, <https://doi.org/10.1002/pip.3262>



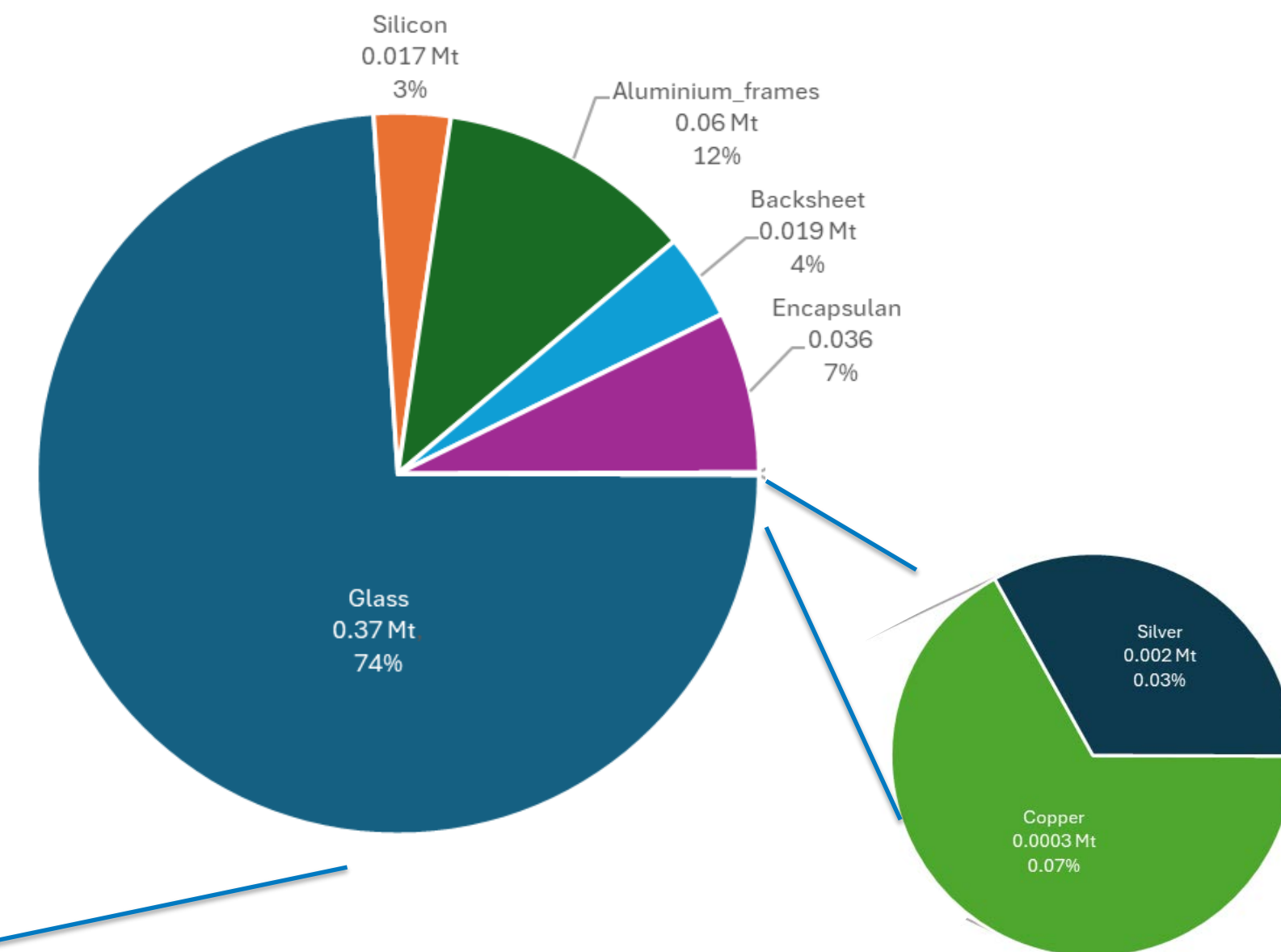
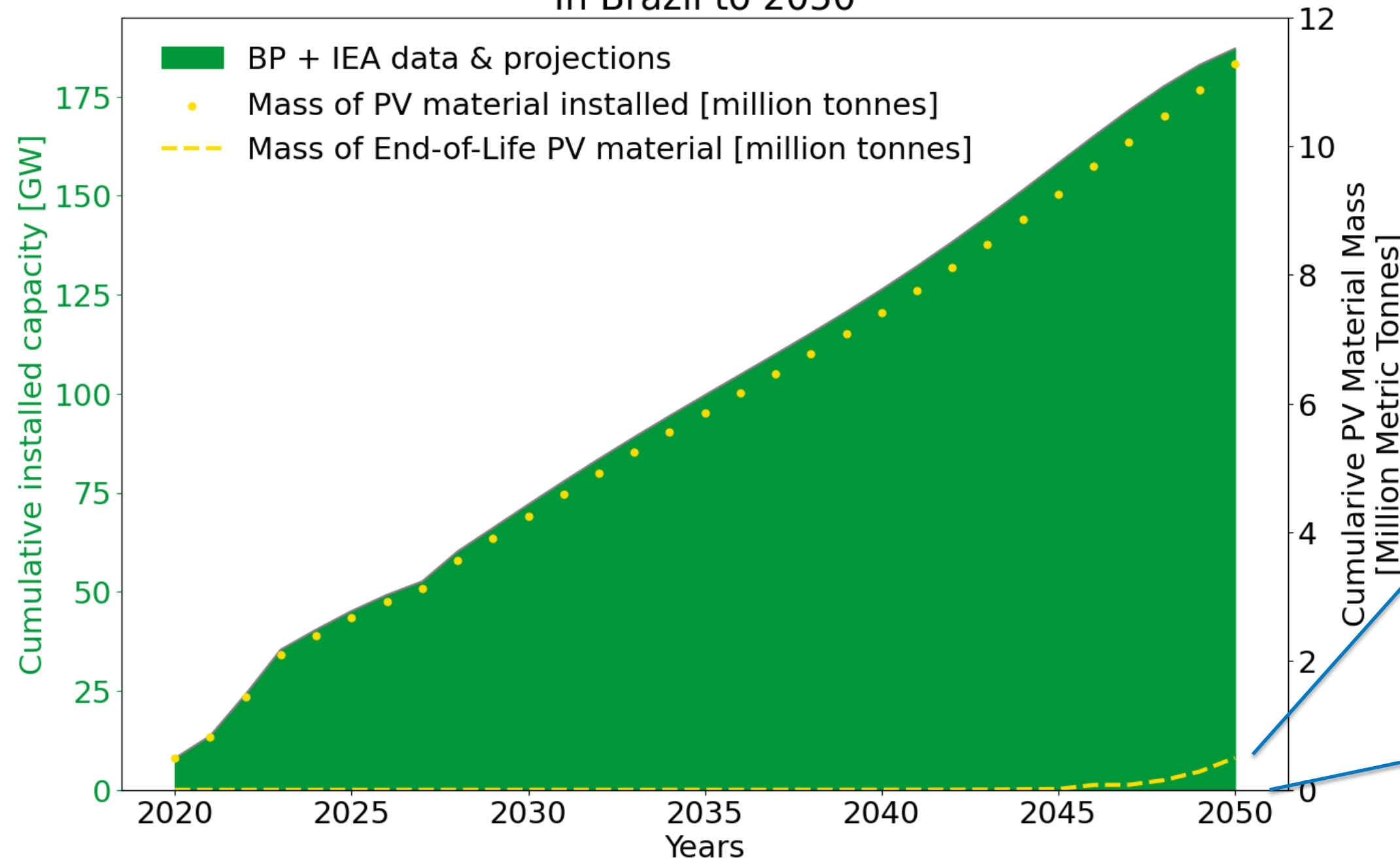
Waste

Fim de vida Brasil

Cumulative Installed Capacity and PV Materials In Brazil to 2050

- Dados históricos da Absolar
- Projeções até 2027 - Plano Nacional Década, Cenário Otimista, (com fator de correção com respeito às instalações de 2023)
- Projeções 2027 a 2050 do IEA World Energy Outlook 2023, Cenário Matriz Elétrica 100% renovável em 2050 (Meta de 2050 é **2.4x** a do PNE 2050)

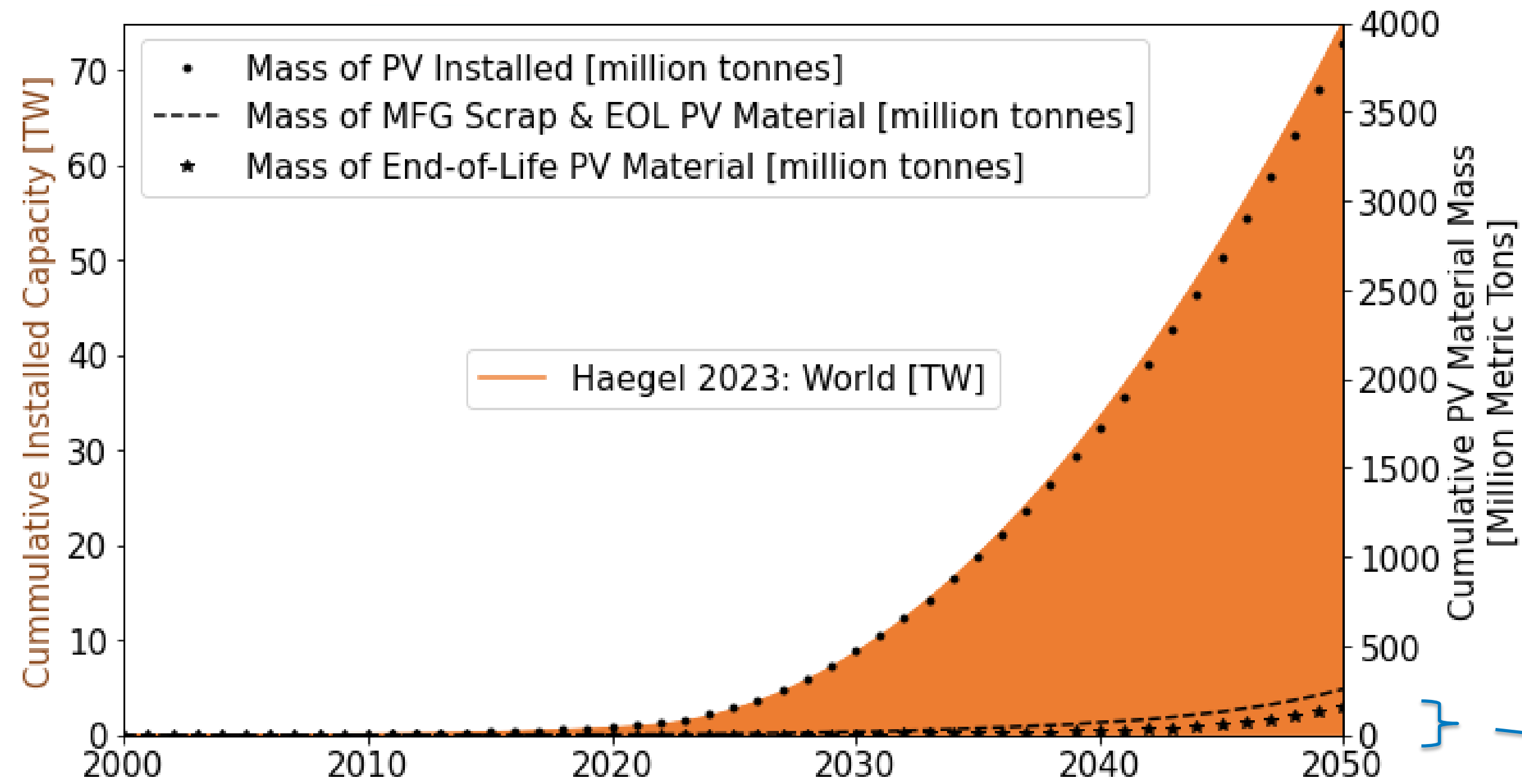
Warning: resultados em desenvolvimento, necessita de mais adaptação para a implementação de tecnologias e práticas no Brasil



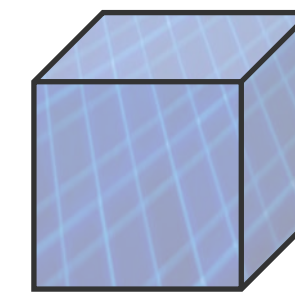


Waste

Fim de vida (Mundo)

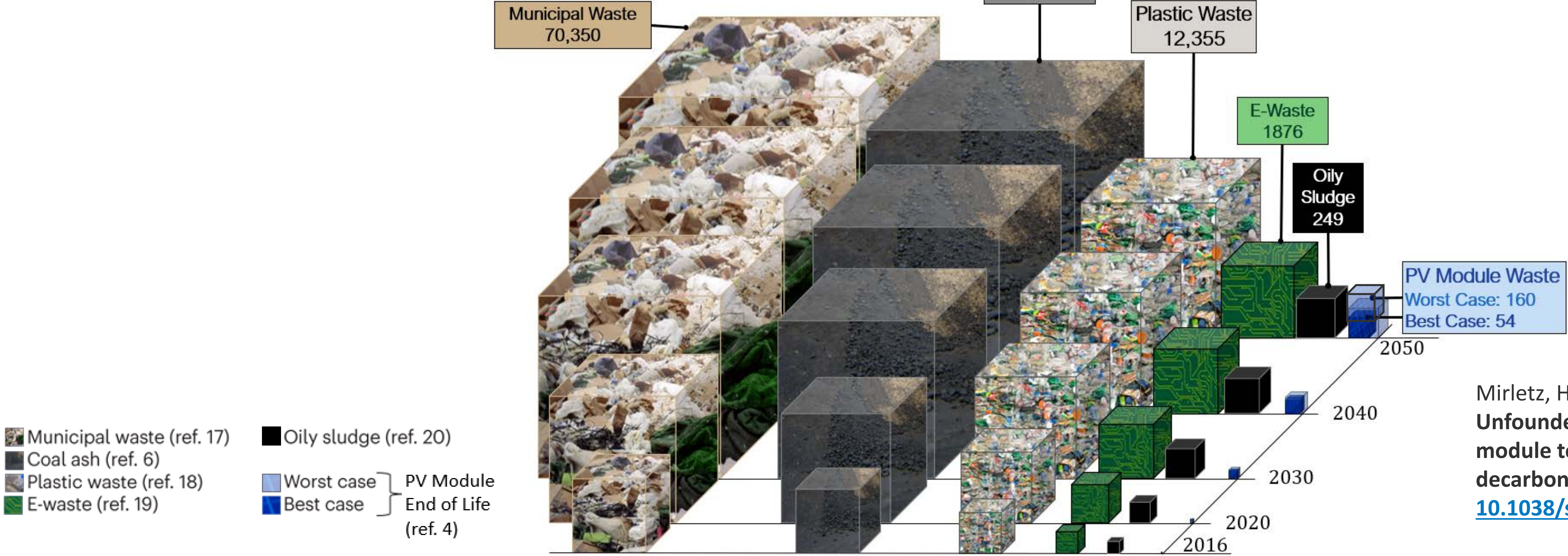


Mirletz 2023 PVRW



Cumulative Wastes

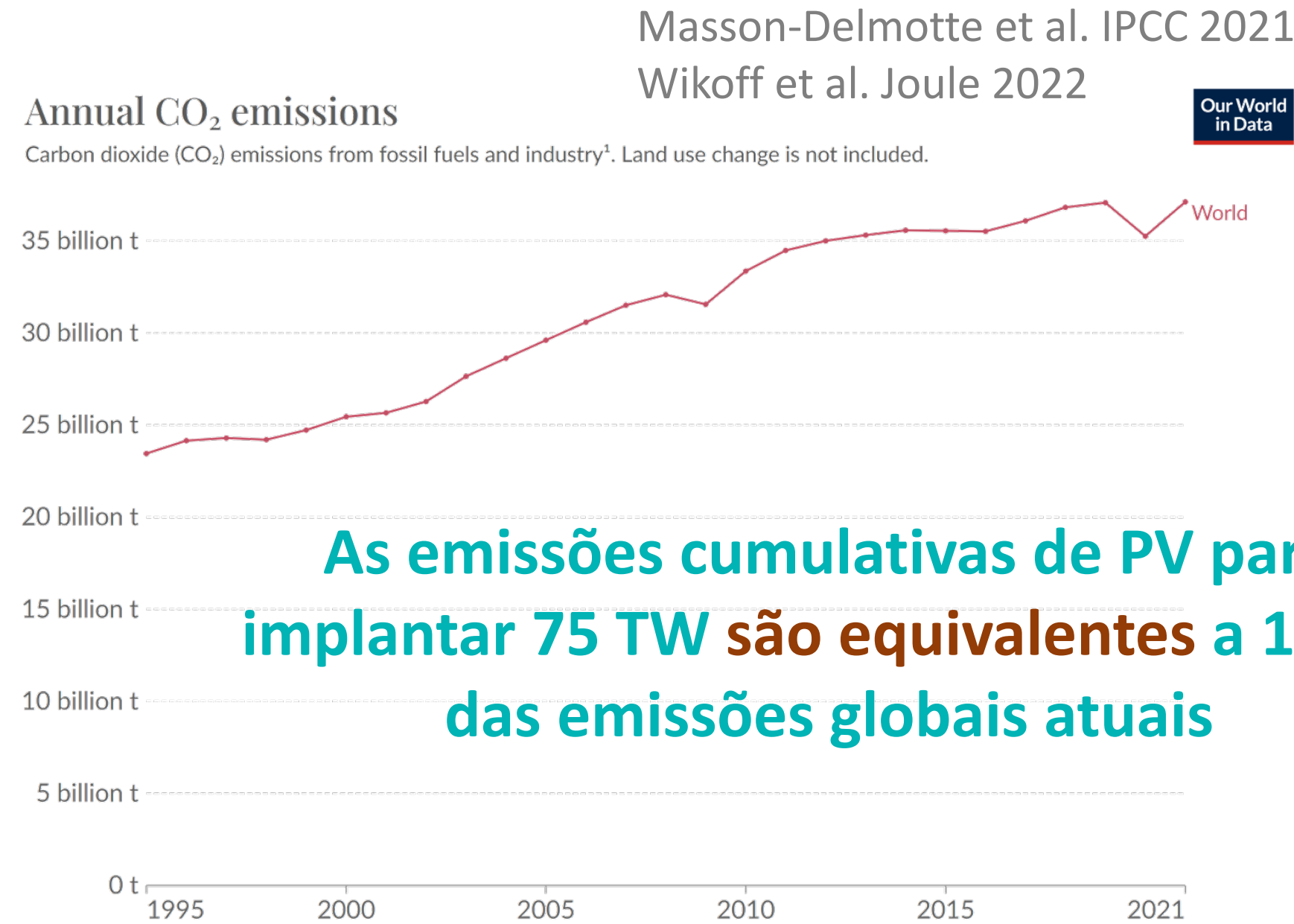
[million metric tons]



Mirletz, Hieslmair, Ovaitt, Curtis, Barnes. **Unfounded concerns about photovoltaic module toxicity and waste are slowing decarbonization.** NATURE, 2023 [10.1038/s41567-023-02230-0](https://doi.org/10.1038/s41567-023-02230-0)



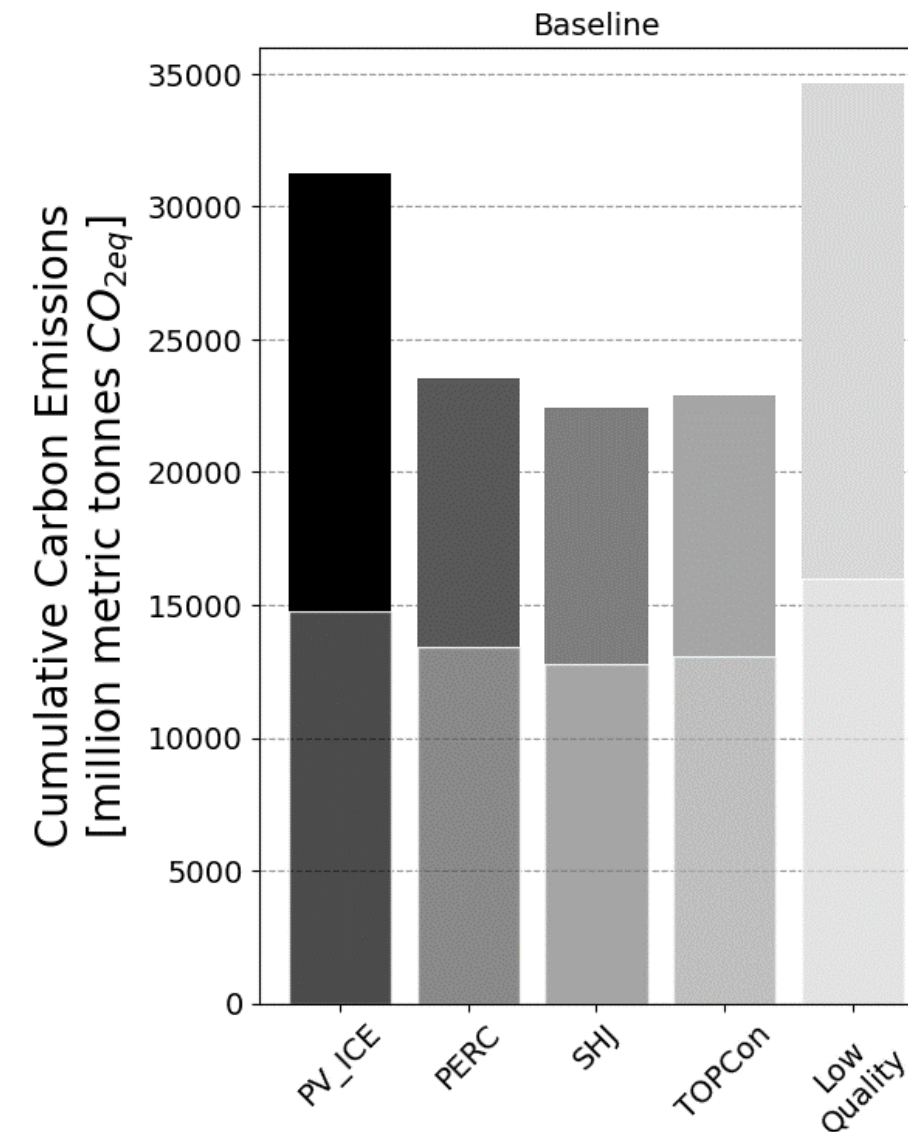
As emissões cumulativas de FV são uma pequena fração do orçamento de carbono



As emissões cumulativas de PV para implantar 75 TW são equivalentes a 1 ano das emissões globais atuais

Data source: Global Carbon Budget (2022)

OurWorldInData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY



FV consome ~6% do Orçamento de Carbono
Cenário 50% de chance de um Orçamento de Carbono de 1.5°C = 500 bilhões de toneladas métricas



Toxicidade de PV

U.S. state health department websites:

- Arsenic
 - Gallium
 - Germanium
 - Hexavalent Chromium
- III-Vs para a indústria aeroespacial
- usado em silício amorfo mas não fora do laboratório
- Não usado em células. Aquecedores de água?

O PV precisa de uma 'licença social para operar'.
O sentimento da comunidade é crucial!

Others

- Cadmium (CdTe) –sucesso da reciclagem em circuito fechado
- PFAs – **múltiplos** átomos de flúor

Revestimentos autolimpantes? Muitas químicas de silício não perigosas; opções comerciais de autolimpeza (não solares) contêm algumas.

Adesivos? Adesivos solares são baseados em polímeros de silício.

Backsheets? Tedlar - polímero resistente às intempéries que não é um composto PFAS em si e não faz uso de PFAS durante seu processo de fabricação. Alguns outros têm compostos fluorados, mas eles não são PFAS livres, desde que você não queime

A. Anctil (2023) "Facts about solar panels: PFAS contamination."



Mirletz, H., H. Hieslmair, S. Ovaitt, T. L. Curtis, and T.M. Barnes. 2023. "Unfounded Concerns about Photovoltaic Module Toxicity and Waste Are Slowing Decarbonization." *Nature Physics* [10.1038/s41567-023-02230-0](https://doi.org/10.1038/s41567-023-02230-0)



Virgin Material

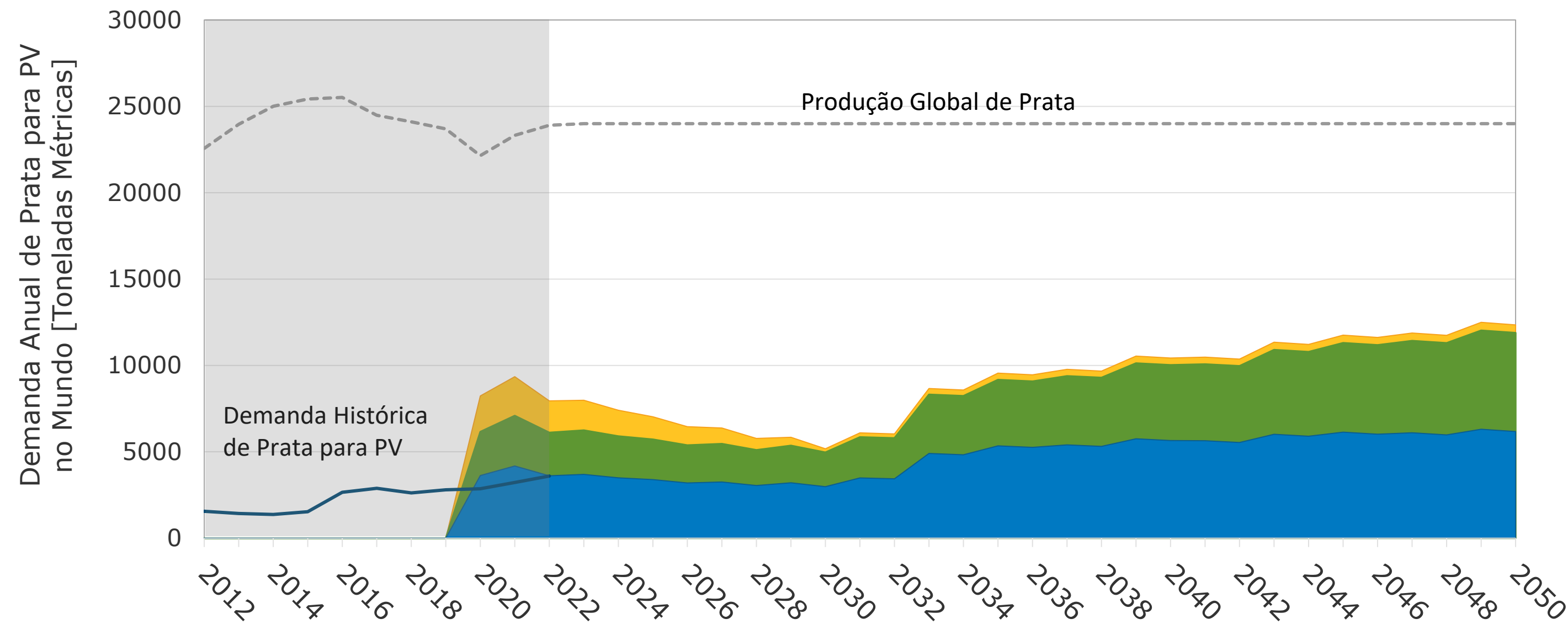
A inovação pode mitigar os preços da prata



Energy In

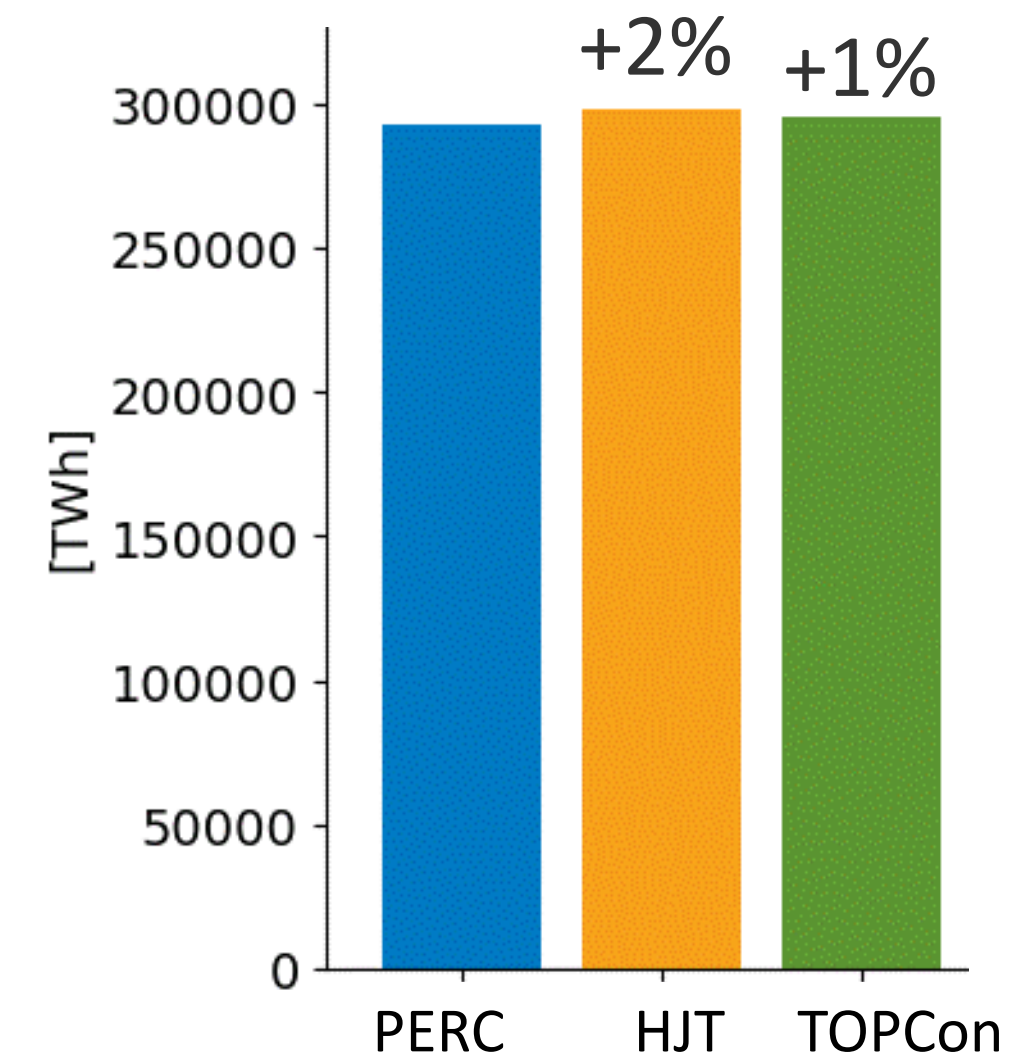


Energy Out



Barnes, et al. 5th International SHJ Workshop, CEA-INES 2022

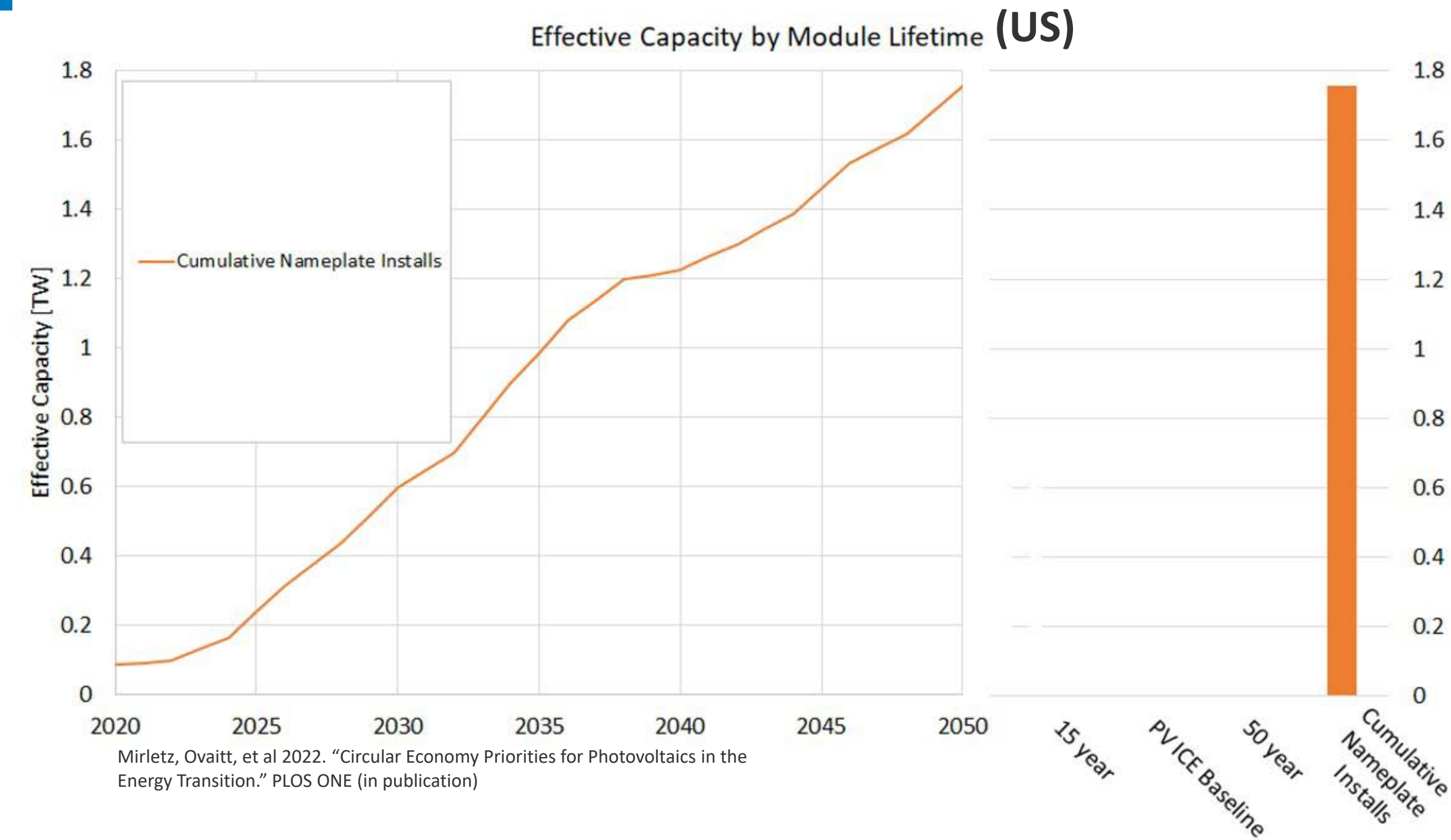
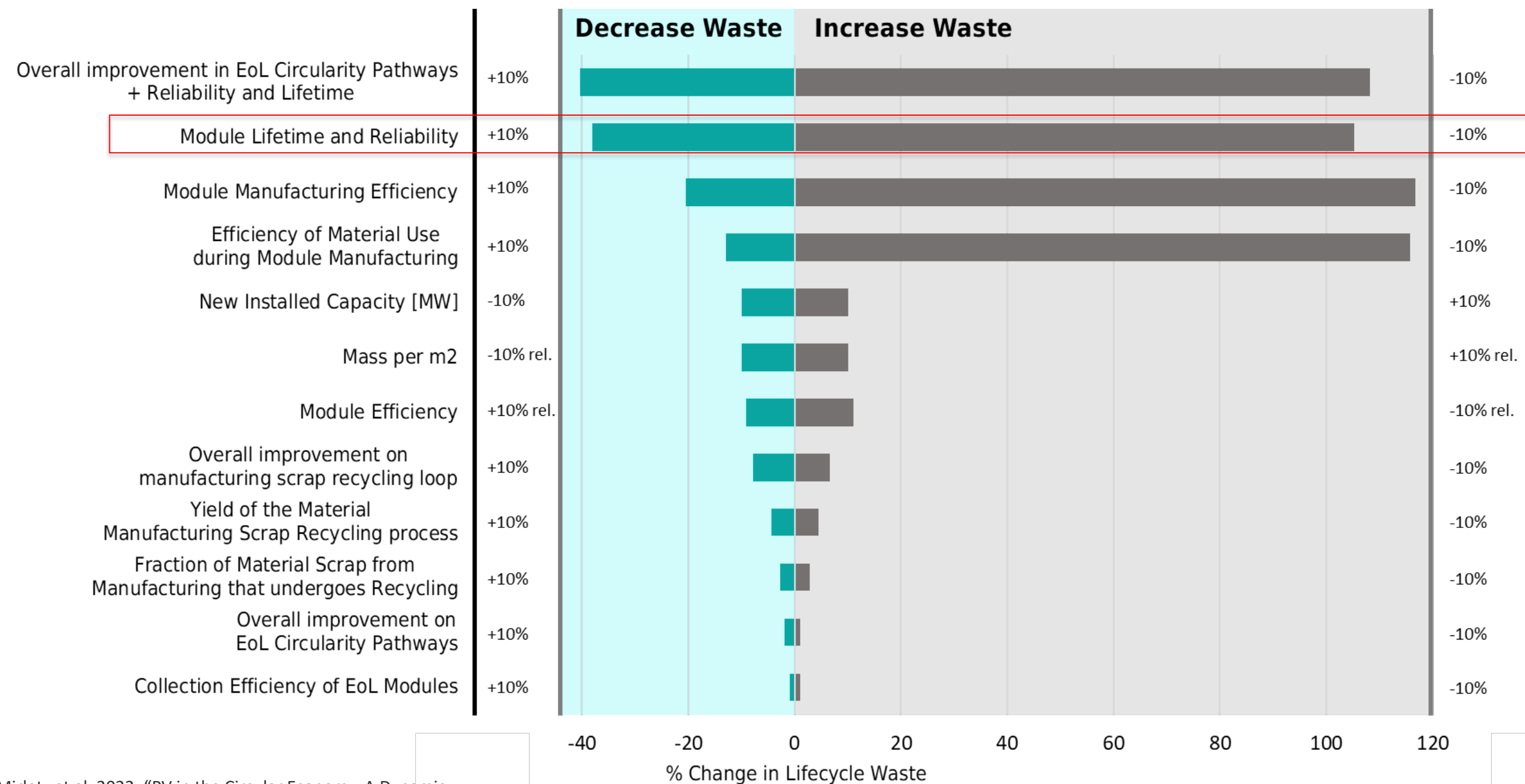
Energia Cumulativa Gerada





Waste

Alavancas para melhorar as métricas de massa e energia



Vidas úteis curtas dos projetos exigem mais substituições, mais rapidamente

Ovaitt & Mirletz et al, 2022. "PV in the Circular Economy, A Dynamic Framework Analyzing Technology Evolution and Reliability Impacts." ISCIENCE <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103488>.

O caminho a seguir

Vida útil de 50 anos? Perovskites? Tandems?
Mistura? Outras?

<https://doi.org/10.1051/epjpv/2024015>

benefício para
as metas energéticas

benefício para
as metas de materiais

Vida útil

Eficiência

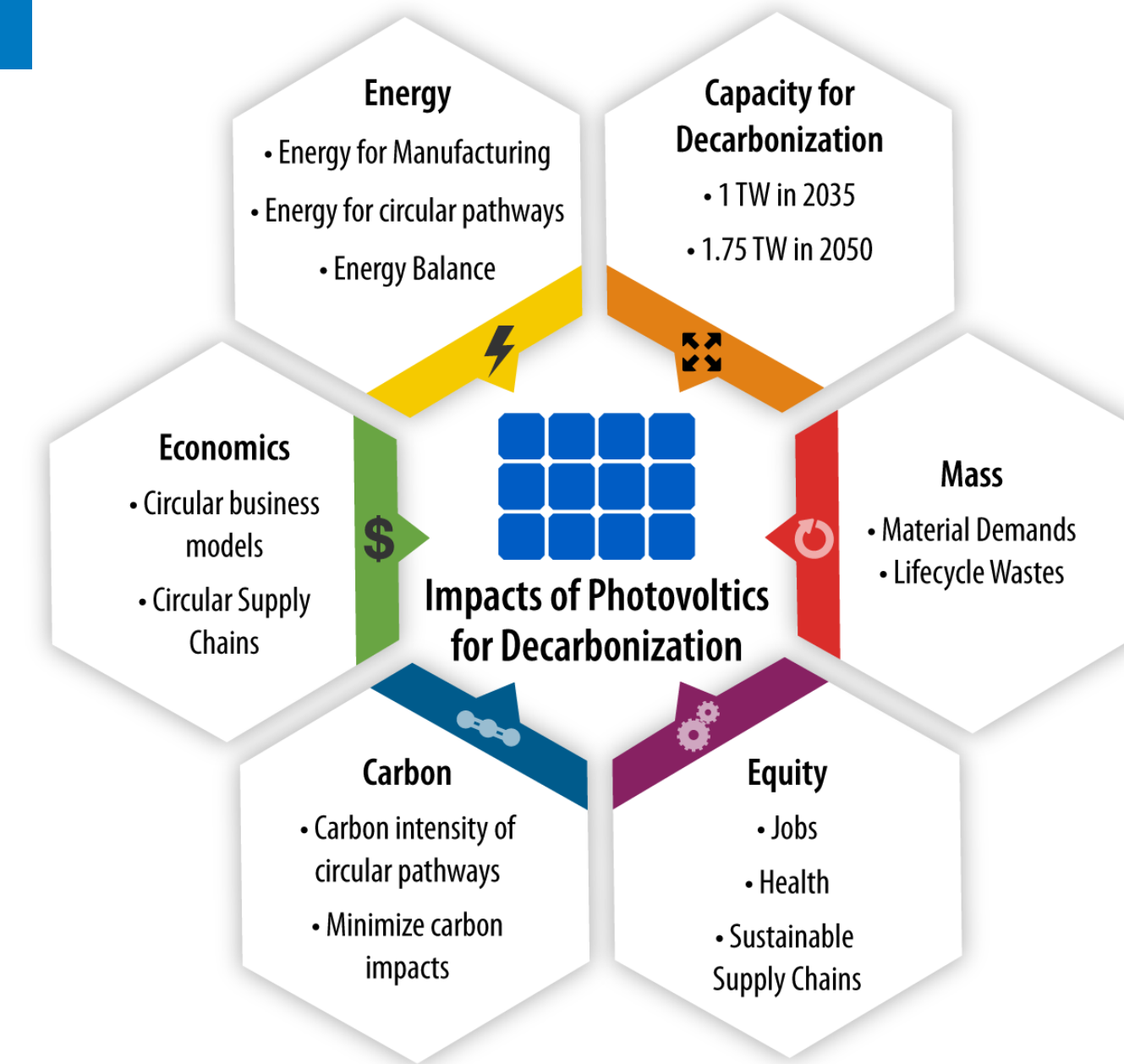
Circularidade

CONFIABILIDADE

Aspectos ambientais, sociais e políticos

Conclusões

- Módulos E sistemas confiáveis e de longa vida útil são críticos para atingir as metas de capacidade e descarbonização.
- Temos que instalar PV confiável o mais rápido possível, aprender mais rápido e continuar melhorando – as metas da transição energética exigem uma velocidade sem precedentes com pouco espaço para erros.
- **Precisamos de uma base científica e técnica sólida**
- Foco no objetivo – não estamos competindo entre tecnologias renováveis
- A fabricação mais sustentável é frequentemente mais eficiente e reduz custos.
- Os resíduos de fim de vida são gerenciáveis com melhorias constantes na tecnologia, políticas e economia.
 - Os volumes de resíduos aumentarão com a capacidade de reciclagem
 - Oportunidades de circularidade – por exemplo, vidro



Instale agora! 😊



Palestra na UFSC 05/23/24



Pesquisa de Sistemas Bifaciais no NREL

<https://tinyurl.com/UFSCNRELBifacial>

<https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/90049.pdf>



Palestra do MESOL na X CBENS 05/27/24

<https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/90050.pdf>

www.nrel.gov

silvana.ovaitt@nrel.gov

NREL/PR-5K00-90066

Obrigada > ABENS, CBENS, MESOL,
UFSC (Marília, Amanda, Lucas), Lia Costa (BYD)

This work was authored [in part] by the National Renewable Energy Laboratory, operated by Alliance for Sustainable Energy, LLC, for the U.S. Department of Energy (DOE) under Contract No. DE-AC36-08GO28308. Funding provided by the U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) under Solar Energy Technologies Office (SETO) agreements. The views expressed in the article do not necessarily represent the views of the DOE or the U.S. Government.

