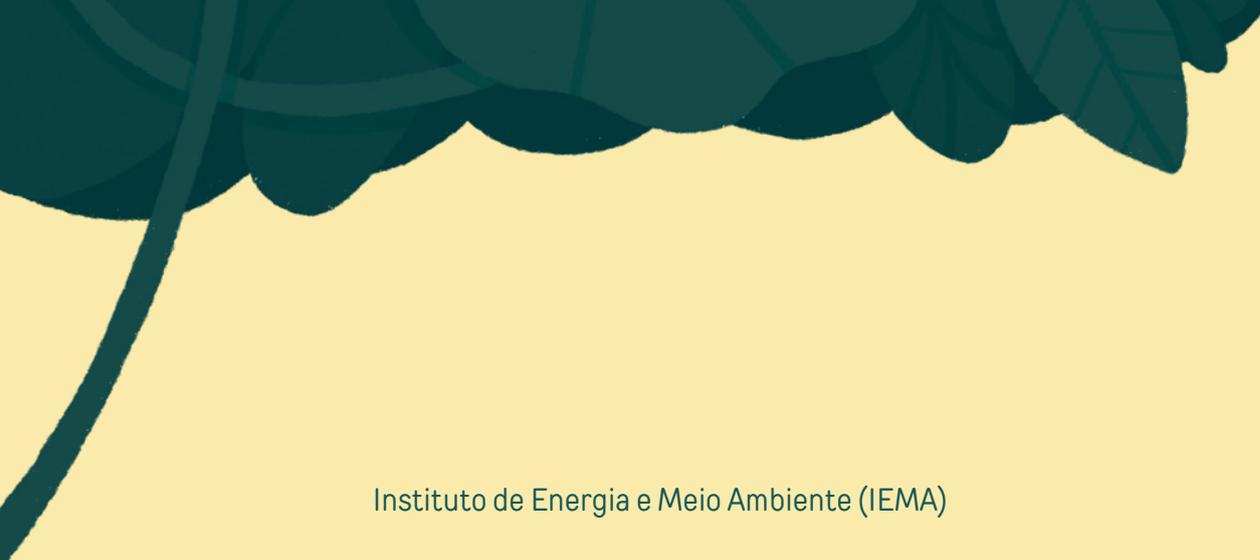




**SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS  
NA AMAZÔNIA LEGAL:  
AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO  
DE POLÍTICAS PÚBLICAS  
DE UNIVERSALIZAÇÃO  
DE ENERGIA ELÉTRICA  
E LOGÍSTICA REVERSA**



Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA)

**Sistemas Fotovoltaicos na Amazônia Legal:  
avaliação e proposição de políticas públicas  
de universalização de energia elétrica  
e logística reversa**

Maio de 2023

---

**Equipe técnica:**

André Luis Ferreira  
Fabio Galdino dos Santos  
Isis Rosa Nóbile Diniz  
Ricardo Lacerda Baitelo  
Vinícius Oliveira da Silva

**Comunicação:**

Isis Rosa Nóbile Diniz

**Revisão ortográfica:**

Ana Paula Freire Artaxo

**Projeto gráfico e diagramação:**

Ana Paula Campos/ Estúdio Voador

**Ilustração:**

Daniela Chun

**Apoio:**

Charles Stewart Mott Foundation



### **Sobre o IEMA:**

O Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) é uma Organização da Sociedade Civil de Interesse Público (OSCIP) fundada no Brasil em 2006. Tem como foco a produção e a disseminação de conhecimento técnico-científico para subsidiar a formulação e a avaliação de políticas públicas, atuando com o propósito de qualificar os processos decisórios para que os sistemas de transporte e de energia no país assegurem o uso sustentável de recursos naturais com desenvolvimento social e econômico.

### **Quem somos:**

André Luis Ferreira  
David Shiling Tsai  
Fabio Galdino dos Santos  
Felipe Barcellos e Silva  
Gabrielly de Castro Alves  
Helen Sousa  
Isis Rosa Nóbile Diniz  
Ingrid Graces  
Marcelo dos Santos Cremer  
Mônica Takeda  
Raissa Gomes  
Rodrigo Pimenta  
Ricardo Lacerda Baitelo  
Vinícius Oliveira da Silva



[twitter.com/iema\\_instituto](https://twitter.com/iema_instituto)



[linkedin.com/company/instituto-de-energia-e-meio-ambiente](https://www.linkedin.com/company/instituto-de-energia-e-meio-ambiente)



[facebook.com/institutoenergiaambiente](https://www.facebook.com/institutoenergiaambiente)



[instagram.com/energiaambiente](https://www.instagram.com/energiaambiente)

# SUMÁRIO

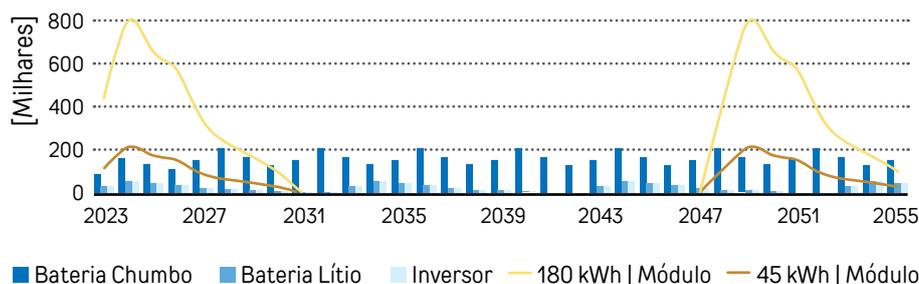
<b>Sumário executivo</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>14</b>
<b>2 Desafios da indústria solar fotovoltaica no atendimento à demanda de sistemas <i>off-grid</i> em áreas remotas da Amazônia Legal</b> .....	<b>17</b>
2.1 Dimensionamento da demanda de sistemas fotovoltaicos <i>off-grid</i> para universalizar o acesso à energia elétrica na Amazônia Legal .....	22
2.2 Cadeia da indústria de energia solar fotovoltaica no Brasil .....	27
2.3 Cadeia de armazenamento .....	29
2.4 Dependência do mercado fotovoltaico internacional .....	32
<b>3 Avaliação da geração de resíduos do programa MLA e das políticas de resíduos sólidos na região da Amazônia Legal</b> .....	<b>35</b>
3.1 Dimensionamento da geração de resíduos sólidos no âmbito do MLA .....	35
3.2 Potencial de reciclagem de componentes de sistemas fotovoltaicos .....	42
3.3 O estágio atual da logística reversa no Brasil .....	46
<b>4 Conclusões e Recomendações</b> .....	<b>57</b>
4.1 Aprimoramento da cadeia solar fotovoltaica e de armazenamento para o suprimento de sistemas <i>off-grid</i> na Amazônia Legal .....	59
4.2 Implantação efetiva de logística reversa e de reciclagem para os componentes dos sistemas <i>off-grid</i> a serem instalados na Amazônia Legal .....	64
<b>Referências bibliográficas</b> .....	<b>69</b>
<b>Anexo A</b> .....	<b>74</b>
<b>Anexo B</b> .....	<b>77</b>
<b>Anexo C</b> .....	<b>78</b>

## SUMÁRIO EXECUTIVO

- O Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica na Amazônia Legal – Mais Luz para a Amazônia (MLA) – opta pela implementação de sistemas fotovoltaicos *off-grid* (autônomo, não conectado à rede) aliados a sistemas de armazenamento de energia por baterias para suprir a demanda das pessoas sem acesso ao serviço público de energia elétrica, em locais remotos da Amazônia Legal.
- **A priorização do atendimento às unidades consumidoras exclusivamente por fontes renováveis, como proposto no programa MLA, é uma decisão coerente do Estado,** já que se busca realizar o acesso à energia elétrica de forma sustentável. Considerando que geralmente são áreas de difícil acesso e de ecossistema sensível, este trabalho visa identificar e analisar o grau de desenvolvimento da cadeia de fornecimento e de descomissionamento de sistemas fotovoltaicos e de armazenamento por baterias no Brasil. **O objetivo é elucidar quais os possíveis desafios a serem enfrentados e, assim, garantir a implementação de sistemas, desde seu início, da maneira mais socioambientalmente adequada possível.**

Componentes	TOTAL	
<b>MÓDULO FV</b>	<b>45 kWh/mês</b>	<b>1.753.770</b>
	<b>180 kWh/mês</b>	<b>6.576.637</b>
<b>INVERSOR</b>		<b>784.811</b>
<b>BATERIA DE CHUMBO-ÁCIDO</b>		<b>5.435.991</b>
<b>BATERIA DE ÍON-LÍTIO</b>		<b>784.811</b>

- Para atender às metas de universalização do MLA, **seria necessária a utilização de mais de três milhões de equipamentos ao longo da vida útil dos sistemas**, se empregado o cenário de atendimento com Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente (SIGFI) de 45 kWh/mês, com bateria de íon-lítio, e de **12 milhões de equipamentos para o cenário com SIGFI de 180 kWh/mês, com bateria de chumbo-ácido**.
- Com relação ao sistema de geração de energia elétrica, o módulo fotovoltaico é responsável pela maior quantidade de componentes. Porém, com a vantagem de que sua vida útil permite **reposição apenas em dois períodos consecutivos ao longo dos 32 anos de operação** considerados nos cenários de análise. Isto é, sendo predominantes até 2026, para o SIGFI 45, e até 2030, para o SIGFI 180, **com picos de inserção que ultrapassam 200 e 800 mil componentes no ano**, respectivamente, ocorrendo no segundo ano do cenário analisado. Em ambos os casos, **a substituição dos módulos fotovoltaicos se repete a partir de 2048, coincidindo com o final da vida útil das primeiras unidades implementadas**.

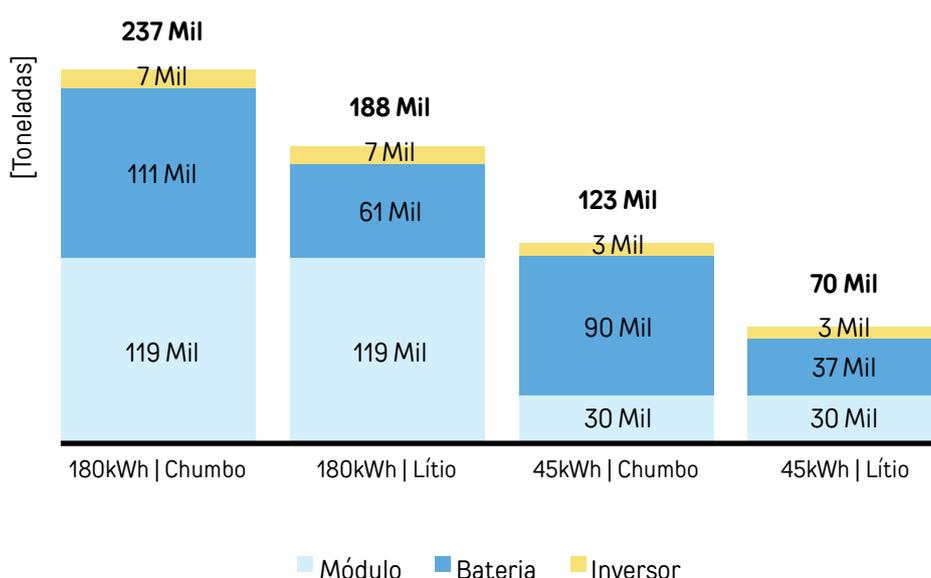


- Sobre as baterias para armazenar a energia elétrica gerada pelos módulos fotovoltaicos, a do tipo **chumbo-ácido** exige constante reposição — a cada três anos. **Ao longo do cenário analisado, sua inserção seria acima de 100 mil componentes ao ano, podendo alcançar 200 mil unidades.** Já a bateria de **íon-lítio e o inversor solar**, equipamento que transforma a corrente contínua para corrente alternada, **necessitam de quatro trocas, sem ultrapassar 100 mil componentes em cada troca.**
- **Em 2030, a capacidade instalada do programa MLA atingirá 363 MWp (Megawatt-pico), considerando o padrão SIGFI 45. No padrão SIGFI 180, a capacidade será de 1.381 MWp.** Este valor é maior do que a atual capacidade instalada residencial de geração distribuída fotovoltaica (GDFV) de cada Estado brasileiro. Atualmente, São Paulo aparece em primeiro lugar, com 1.282 MWp, seguido pelo estado do Rio Grande do Sul, com 922,2 MWp.
- Caso o atendimento de todas as 219.221 unidades consumidoras via programa MLA seja feito por sistemas individuais, esse número seria equivalente a **16% da quantidade de sistemas residenciais atualmente instalados em todo o país**, além de ser superior à capacidade instalada de geração distribuída fotovoltaica (GDFV) residenciais da Região Centro-Oeste e Norte do país, região de atuação do MLA.
- **As baterias de chumbo-ácido têm menor preço** em relação aos outros tipos de baterias, baixa complexidade de implementação, dispensam a necessidade de controle da temperatura de operação e contam com uma cadeia de logística e de reciclagem madura, características divergentes das baterias de íon-lítio. Por outro lado, **a bateria de íon-lítio tem mais durabilidade**, menor tempo de recarga e maior de descarga e carregamento, reduzindo a necessidade de substituições e manutenções ao longo da vida útil do sistema.
- **As baterias de chumbo-ácido dominam os sistemas de armazenamento de energia, ao passo que baterias do tipo**

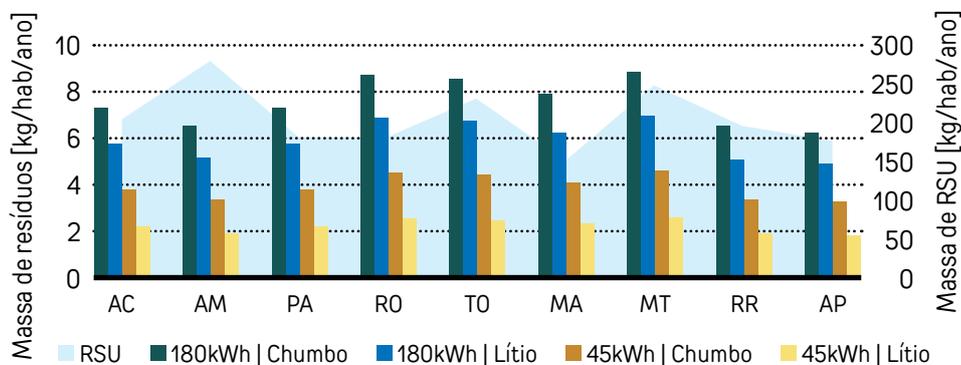
**íon-lítio limitam-se a projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).** Diferentemente da cadeia solar, não há base de dados e de informações estruturadas sobre o número, a potência e a distribuição de baterias instaladas com a função de armazenar energia elétrica em sistemas híbridos de geração elétrica no Brasil.

- Atualmente, a rede solar fotovoltaica tem focado nos grandes sistemas centralizados e na geração distribuída conectada à rede elétrica (*on-grid*) e não nos sistemas *off-grid*, em regiões remotas. **A sua cadeia de produção de equipamentos está concentrada nas Regiões Sul e Sudeste,** em locais com infraestrutura de transporte e acesso aos pontos de importação (portos) e aos fabricantes de equipamentos, componentes e estruturas de instalação nacionais. É reduzido o número de empresas integradoras instaladas na Região Norte. Esse desequilíbrio regional também se reflete na formação e na disponibilidade de colaboradores especializados na rede solar fotovoltaica.
- **Não há dados disponíveis sobre áreas referentes aos sistemas off-grid instalados e operantes no Brasil.** Tal insuficiência de informações resulta em desafios como, por exemplo, o mapeamento exato das comunidades e unidades consumidoras que carecem do acesso à energia elétrica e da quantidade de trabalhadores qualificados que seriam necessários para a instalação desses sistemas. A estruturação e a disponibilização de dados e informações representam um gargalo significativo para o acompanhamento, a fiscalização e a proposição de sugestões, avaliações e melhorias dos programas de acesso à energia elétrica.
- **Essa deficiência ocorre no programa MLA, que não conta com informações disponíveis sobre os locais sem acesso à energia elétrica ou sobre os sistemas implementados,** apesar da obrigatoriedade dessa disponibilização. Não há uma base de dados tabulados ou georreferenciados para o monitoramento das conexões e características dos sistemas instalados via programa.

- É crescente a discussão sobre o uso de baterias de íon-lítio de segunda vida, cuja capacidade de recarga rápida está esgotada, mas que ainda podem ser úteis para a aplicação estacionária (imóvel). No entanto, seu uso em sistemas isolados e remotos da Amazônia gera incertezas à medida que têm vida útil menor do que as baterias novas e podem apresentar problemas técnicos no curto prazo. Além disso, seu custo é alto quando comparado ao das baterias veiculares tradicionais (chumbo-ácido) e do sistema de geração fotovoltaica, com o agravante de se destinar resíduos (baterias usadas) de uma cadeia para atender uma região sem serviço de saneamento, como a Amazônia.
- **No final da vida útil dos sistemas instalados via MLA, seriam produzidos entre 71 mil e 237 mil toneladas de resíduos.** O SIGFI 180 com bateria de chumbo-ácido gera cerca de 7 mil toneladas/ano, correspondendo a quase que o dobro dos resíduos eletrônicos coletados no Brasil, em 2021. Já os SIGFI 45, com bateria de íon-lítio, correspondem a 54% da massa desses equipamentos.



- **Ao longo do programa MLA, pode ser gerado um total de 119.356 toneladas de resíduos dos módulos fotovoltaicos, pelos sistemas de 180 kWh, e de 31.854 toneladas, pelos sistemas de 45 kWh.** Vidro e moldura de alumínio respondem por 88% do material.
- Considerando a totalidade de resíduos gerados ao longo do programa MLA, dividida linearmente ao longo dos 32 anos analisados, os estados do **Acre, Amapá e Amazonas produziram a menor quantidade de resíduos anual por habitante. Mato Grosso, Rondônia e Tocantins, por sua vez, seriam os maiores geradores de resíduos por habitante.**
- O Pará, detentor do maior número de unidades consumidoras a serem atendidas pelo programa MLA, teria 2,2 kg/hab/ano de resíduos com sistemas SIGFI 45 à bateria de íon-de-lítio. Para o sistema SIGFI 180 com bateria de chumbo-ácido, esse valor aumentaria para 7,3 kg/hab/ano.
- Por outro lado, o Mato Grosso, que tem a menor meta de atendimento do programa, apresenta a maior quantidade de resíduos gerados anualmente por habitante, pois registra o menor número de habitantes por unidade consumidora. Estima-se a geração de 2,7 kg/hab/ano nos SIGFI 45 com bateria de íon-lítio e 8,9 kg/hab/ano nos SIGFI 180 com bateria de chumbo-ácido. Em 2019, o estado do Mato Grosso gerou 246 kg/hab/ano de resíduos sólidos urbanos (RSU).



- Vale ressaltar que **esses valores de geração de resíduos no âmbito do programa MLA estão subestimados** porque desconsideram outros componentes. Mesmo assim, serão superior à coleta anual de equipamentos eletroeletrônicos em todo país, maior parte realizada na Região Centro-Sul.
- **Os resíduos das baterias de íon-lítio, para atendimento das unidades consumidoras do programa MLA, podem alcançar entre 37 mil e 61 mil toneladas. Sobre as baterias de chumbo-ácido, o valor pode chegar a mais de 90 mil toneladas, para o sistema de 45 kWh, e mais de 110 mil toneladas, para o sistema de 180 kWh.** A maioria dos seus componentes é reciclável. No entanto, a cadeia de descomissionamento e de logística reversa e o mercado de reciclagem deverão atender a essa demanda.
- **É esperado o crescimento da geração de resíduos a partir de 2047, quase triplicando a massa anual de resíduos em 2049** devido ao fim de vida útil da maioria dos módulos fotovoltaicos. Mais da metade dos resíduos ocorreria entre 2047 e 2055 para SIGFI 180. Antes desse período, os resíduos gerados seriam resultantes da danificação e degradação prematura dos módulos fotovoltaicos e da substituição dos inversores solares e das baterias, variando de 42% a 47% da massa total, a depender do sistema de armazenamento.
- **Garantir o efetivo gerenciamento dos resíduos desses sistemas de armazenamento em regiões remotas requer uma cadeia estruturada de descomissionamento,** que deverá arcar com os resíduos gerados a fim de reduzir o seu risco em relação à exposição ambiental e humana, além de garantir a reposição dos recursos de fonte secundária necessários à fabricação de baterias de chumbo.
- Segundo a **Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305/2010,** fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de diversos produtos como baterias automotivas – exclusivamente do tipo chumbo-ácido, também empregadas em sistemas fotovoltaicos – são obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística

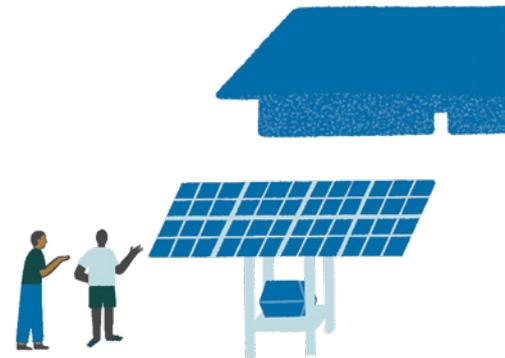
reversa. Porém, **o texto deixa de fora as baterias de íon-lítio, demonstrando que ainda falta um tratamento regulatório no país para esse tipo de tecnologia.**

- Infelizmente, **a logística reversa para esses componentes é praticamente inexistente na Amazônia Legal.** Dos 5.570 municípios brasileiros, apenas 400 (7% do total) contam com serviços de logística reversa e, entre esses, **apenas 58 dos 808 municípios da Amazônia Legal.** Em Tocantins, são apenas dois municípios de 14, e Roraima tem apenas um município entre 14 que oferecem esse serviço. Esses dados demonstram que o Estado brasileiro não tem estrutura e ferramentas para cumprir suas leis e reduzir o possível impacto negativo do lixo gerado ao meio ambiente e à saúde da população.
- **O número de municípios da Região Norte que dispõem de coleta seletiva de resíduos é irrisório — apenas 40 municípios (12% do total).** Destes, 26 (8% do total) possuem coleta seletiva de porta a porta, demonstrando que há uma carência deste tipo de serviço público na região.
- Sobre a destinação final dos resíduos na região, 30 municípios possuem aterro sanitário e 71, aterro controlado. **A maioria, 444 municípios, dispõe os seus resíduos em lixões, e outros 319 não apresentam informação sobre a disposição final dos seus resíduos.**
- Também é proibido importar resíduos sólidos perigosos e rejeitos que causem danos ao meio ambiente, à saúde pública e animal e à sanidade vegetal, incluindo as baterias de segunda vida. Estas não atendem mais à carga do seu uso específico, mas, teoricamente, poderiam ser utilizadas no armazenamento estacionário dos sistemas *off-grid* ou de geração distribuída.
- **Restam lacunas a serem preenchidas para o adequado enfrentamento de dois importantes desafios:** (1) o planejamento e a execução da instalação de milhares de sistemas *off-grid* em áreas remotas, distribuídas em um vasto território com pouca infraestrutura logística de transporte e comunicação; e

(2) o planejamento e a execução da retirada e reciclagem dos resíduos a serem gerados (módulos fotovoltaicos, baterias e componentes) em escala e de forma distribuída.

- **Este trabalho traz recomendações decorrentes** como a necessidade de: construção e disponibilização pública de base de dados consolidada e de informações georreferenciadas das características socioeconômicas das comunidades remotas da Amazônia Legal; reprodução da base de dados já existente da cadeia solar fotovoltaica de sistemas conectados à rede elétrica para a cadeia solar *off-grid*; criação de centros regionais na Amazônia Legal para a distribuição de sistemas e componentes e descentralizar a mão-de-obra de atendimento e operacionalização do programa; tornar público o processo de licitação, cotação e contratação de serviços e equipamentos para atendimento do programa MLA.
- **Pontua-se também a importância da entrada de novos participantes nessa cadeia, aumentando a competitividade e a eficiência da implementação dos sistemas e garantindo a antecipação da meta de conclusão do programa MLA, prevista para 2030.** É necessária a definição de padrões de projetos adaptados ao local de instalação para diminuir o risco e as barreiras técnicas e econômicas do modelo de negócio.  
**O Estado e as empresas deverão se preparar para a geração de resíduos em escala e desenvolver mecanismos para fomentar e capitalizar as oportunidades desse segmento.** É preciso, ainda, promover a inovação contínua e a capacitação e a formação técnica e científica de profissionais, utilizando os instrumentos de políticas públicas já existentes, como as chamadas estratégicas do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e do Programa de Eficiência Energética (PEE) da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

# 1. INTRODUÇÃO



EXISTEM COMUNIDADES REMOTAS, LOCALIZADAS PRINCIPALMENTE EM ÁREAS DISTANTES DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO E SEDES MUNICIPAIS, QUE ATÉ HOJE ESTÃO EXCLUÍDAS DO ACESSO AO SERVIÇO PÚBLICO DE ENERGIA ELÉTRICA

O Censo 2000 identificou a existência de 2,5 milhões de domicílios sem acesso à energia elétrica. Destes, 80% estavam localizados no meio rural, totalizando 10 milhões de pessoas (IBGE, 2011). Para suprir essa carência, o Governo Federal instituiu, em 2003, o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – Programa Luz para Todos (LpT).

Desde 2004, foram realizadas mais de 3,5 milhões de ligações, beneficiando 16,8 milhões de pessoas (MME, 2018), dando acesso à energia elétrica a 99,8% dos domicílios (IBGE, 2023), evidenciando o inegável avanço proporcionado pelo LpT. No entanto, existem comunidades remotas<sup>1</sup>, localizadas principalmente em áreas distantes das redes de distribuição e sedes municipais, que até hoje estão excluídas do acesso ao serviço público de energia elétrica.

Parcela importante dessa população vive em áreas onde a baixa densidade populacional e as restrições geográficas e ambientais impedem economicamente a extensão das redes de distribuição às comunidades que reivindicam o acesso à energia elétrica – e nem sempre essa energia é proveniente do Sistema Interligado Nacional (SIN) (Silva et al., 2022). Nesses casos, a oferta de serviços públicos de energia elétrica deverá ser viabilizada por meio de geração descentralizada de pequeno porte (Martinez-Bolaños et al., 2021).

Assim, com o objetivo de levar energia elétrica às regiões remotas da Amazônia Legal, o Governo Federal lançou, em 2020, o *Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica na Amazônia Legal – Mais Luz para a Amazônia (MLA)* (MME, 2020), para atender, segundo a determinação da Resolução Homologatória nº 2891/2021, a 219.221 unidades<sup>2</sup> sem acesso a energia elétrica, situadas em regiões remotas da Amazônia Le-

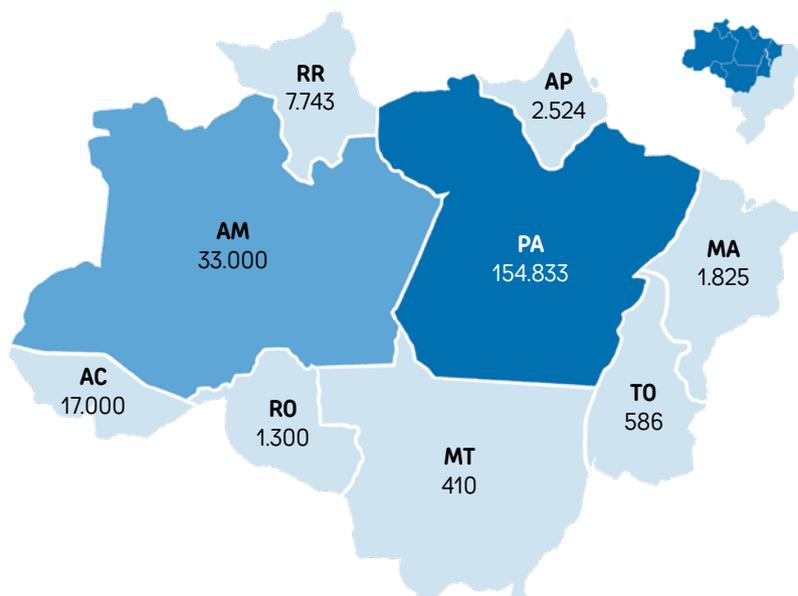
1. Pequenos agrupamentos afastados das sedes municipais e com ausência de economias de escala ou de densidade populacional (Brasil, 2010a).

2. Prioridades de atendimento: famílias de baixa renda inscritas no CadÚnico; assentamentos rurais, comunidades indígenas, quilombolas, residentes em unidades de conservação ou impactadas por empreendimentos de geração e transmissão de energia elétrica; escolas, postos de saúde e poços de água comunitários.

gal (Figura 1) até o final de 2022 (Aneel, 2021). Como as metas de atendimento do programa não foram cumpridas, o governo federal promulgou o Decreto N° 11.111, de 29 de junho de 2022, prorrogando o prazo para 31 de dezembro de 2030 (MME, 2022a).

**Figura 1.** Meta inicial de atendimento do programa MLA por estado da Amazônia Legal.

Fonte: MME (2020).



Vale ressaltar que a priorização do atendimento às unidades consumidoras exclusivamente por fontes renováveis é uma decisão coerente com o programa, já que se busca realizar o acesso à energia elétrica de forma sustentável e permanente ao longo do tempo<sup>3</sup>. Embora o programa MLA permita a utilização de várias fontes renováveis<sup>4</sup>, o atendimento tem priorizado a implementação de sistemas fotovoltaicos *off-grid* aliados ao sistema de armazenamento de energia por baterias. Trata-se de uma tecnologia que se adequa bem à região da Amazônia Legal devido ao potencial de geração solar local e à modularidade da tecnologia. Além disso, esse tipo de tecnologia não emite poluentes e ruídos durante a produção de energia elétrica, exigindo pouca manutenção ao longo do período de operação.

O fornecimento contínuo e estável de componentes e serviços associados e adaptados à região é um desafio para o setor elétrico dadas as especificidades como, por exemplo, grandes

3. A inserção de novas tecnologias nos diversos setores da economia depende de políticas públicas consistentes e de longo prazo (Peyerl et al., 2023), principalmente em locais sem acesso aos serviços públicos e ao crédito, como as populações que vivem em regiões remotas e isoladas da Amazônia Legal.

4. A região conta com potencial de geração de energia a partir das fontes solar, eólica, biomassa e hídrica (EPE, 2022b).

distâncias entre os centros de serviços e as comunidades remotas e dificuldades logísticas. Além disso, é necessário prevenir os riscos ambientais em relação ao descarte de baterias, módulos e inversores, que ainda não fazem parte das discussões do processo regulatório atual.

Devido à necessidade de armazenar energia para períodos noturnos ou com ausência de incidência de luz solar, o sistema fotovoltaico exige que tecnologias de armazenamento sejam inseridas no sistema para permitir o uso da energia durante o dia e à noite. E, nesse caso, o mais comum é a utilização de baterias do tipo chumbo-ácido. Mais recentemente, também vêm sendo utilizadas baterias de íon-lítio, que apresentam complexidade quanto à exigência de substituição, remoção e destinação final adequada ao término do uso para não contaminar o meio ambiente e prejudicar a saúde pública, animal e vegetal local.

**Este relatório busca, portanto, identificar e analisar o grau de desenvolvimento da cadeia de fornecimento e descomissionamento de sistemas fotovoltaicos e de armazenamento por baterias no Brasil; a capacidade dos agentes do setor (fabricantes, fornecedores, integradores) de atenderem à demanda de universalização do programa MLA; e a logística reversa e a gestão de resíduos desses sistemas, visando fornecer subsídios para o aperfeiçoamento de políticas públicas orientadas para a expansão da utilização de energia solar fotovoltaica na Amazônia Legal.**

Para tanto, a pesquisa está dividida em quatro capítulos. Este **capítulo introdutório** apresenta a contextualização do programa de universalização do acesso à energia elétrica na Amazônia Legal. O **capítulo 2** dimensiona a demanda de equipamentos para os sistemas *off-grid* exigidos pelo programa MLA e discute os desafios do mercado solar fotovoltaico brasileiro em atender a demanda por sistemas *off-grid* no âmbito do programa MLA. O **capítulo 3** dimensiona a geração de resíduos dos sistemas fotovoltaicos *off-grid* e analisa se a região da Amazônia Legal possui estrutura operacional para realizar a logística reversa dos sistemas implantados no programa MLA. No **capítulo 4**, são apresentados os desafios, as sugestões e os encaminhamentos para o atendimento de 100% das unidades consumidoras indicadas no programa MLA e para lidar com os resíduos oriundos da implantação e descomissionamento dos sistemas ao longo da sua vida útil no território da Amazônia Legal.

## 2. DESAFIOS

### 2.0 – DESAFIOS DA INDÚSTRIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO ATENDIMENTO À DEMANDA DE SISTEMAS OFF-GRID EM ÁREAS REMOTAS DA AMAZÔNIA LEGAL

O Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica na Amazônia Legal – Mais Luz para a Amazônia (MLA) determina que a oferta de energia elétrica seja atendida a partir de fontes renováveis de geração descentralizada de pequeno porte (Figura 2), utilizando Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente (SIGFI) ou de Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDI). O Manual de Operacionalização do MLA define que a energia disponibilizada mensalmente deve ser entre 45 kWh e 180 kWh por unidade consumidora (como residência, escola, posto de saúde, poço de água comunitário e centro comunitário de produção) (MME, 2020).

**Figura 2.** Características básicas dos sistemas SIGFI ou MIGDI para atendimento do programa MLA.

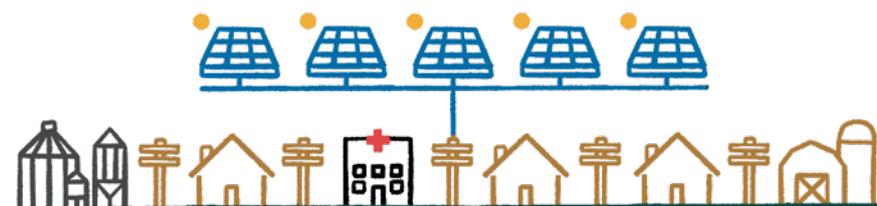
#### **SIGFI**

- Sistema individual descentralizado não conectado à rede ou off-grid;
- Unidade individual de pico ou microgeração;
- Atender a uma única unidade consumidora.



#### **MIGDI**

- Rede compartilhada descentralizada;
- Minigeração com potência de até 100 kWp;
- Atender a unidades consumidoras individuais ou de uso coletivo.



Quanto ao tipo de fonte de geração, necessariamente renovável, todo o atendimento deve ser realizado por sistemas fotovoltaicos com autonomia mínima de 48h, independentemente da capacidade instalada. Ou seja, devem apresentar armazenamento de energia por um período mínimo de dois dias, necessitando do uso de baterias. Além disso, para cada padrão de disponibilidade mensal garantida, há exigência de potência mínima do sistema por unidade consumidora e de consumo de energia diário de referência (Tabela 1).

Disponibilidade mensal garantida [kWh/ mês/UC]	Consumo de referência [Wh/dia/UC]	Autonomia mínima [horas]	Potência mínima [W/UC]
13	435	48	250
20	670	48	250
30	1.000	48	500
45	1.500	48	700
60	2.000	48	1.000
80	2.650	48	1.250
90 a 180	-	-	-

**Tabela 1.** Característica de fornecimento de energia e potência dos padrões SIGFI e MIGDI.

Fonte: Aneel, (2022a).

## POTENCIAL DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NAS UNIDADES CONSUMIDORAS ATENDIDAS NO PROGRAMA MLA

O padrão técnico mínimo da rede elétrica interna do domicílio exigido no manual do programa MLA consiste em um ponto de iluminação por cômodo (até três pontos) com lâmpadas eficientes e duas tomadas para garantir as necessidades básicas de iluminação, comunicação e refrigeração (MME, 2020). Segundo o IBGE (2015), os principais eletroeletrônicos nos domicílios da região Norte são: lâmpadas (>98%), geladeira e televisão (>90%), celular (>64%) e rádio (>50%).

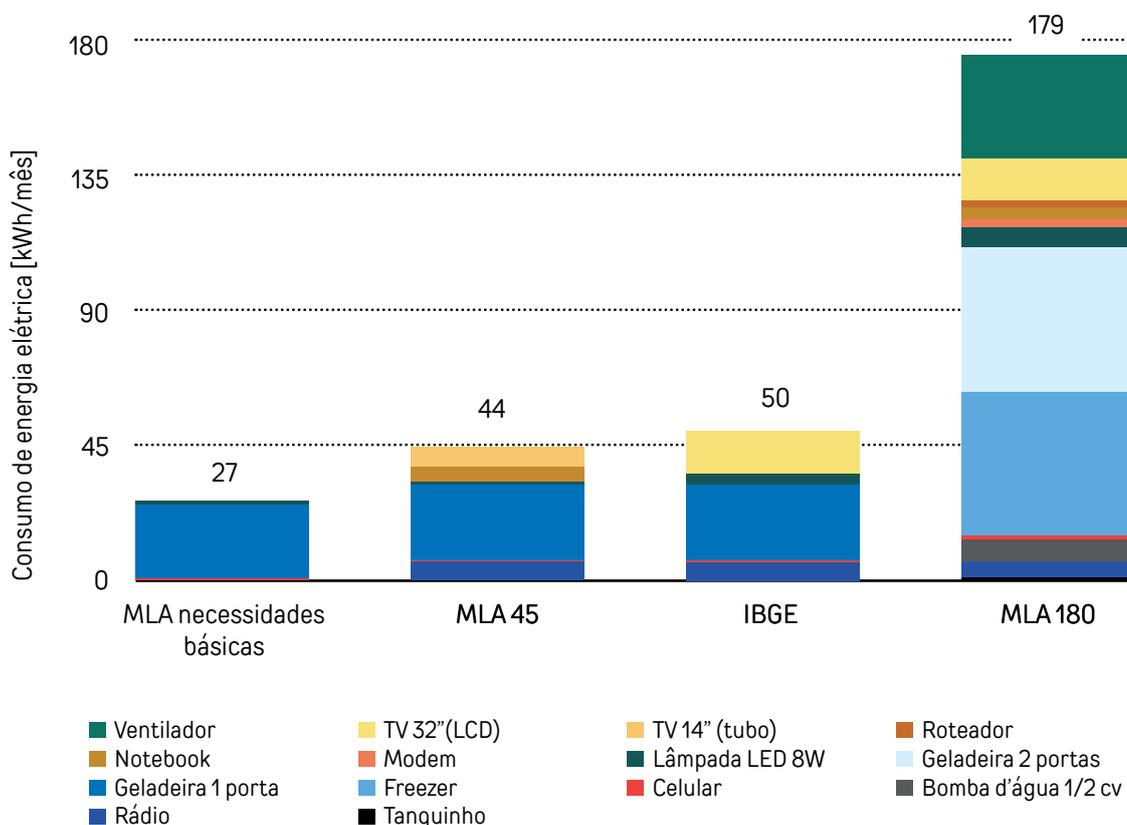
A partir desses usos finais e do consumo médio mensal dos eletroeletrônicos disponibilizados pelo PROCEL (2022), é possível estimar a quantidade e os tipos de equipamentos que cada padrão de atendimento do programa MLA permite utilizar nos domicílios (Figura 3). Por exemplo, com o padrão SIGFI 45,

o menor fornecimento de energia elétrica do programa MLA, é impossível atender à demanda de energia elétrica dos principais equipamentos eletroeletrônicos presentes nos domicílios da região Norte, que exigem pelo menos 50 kWh/mês (IBGE).

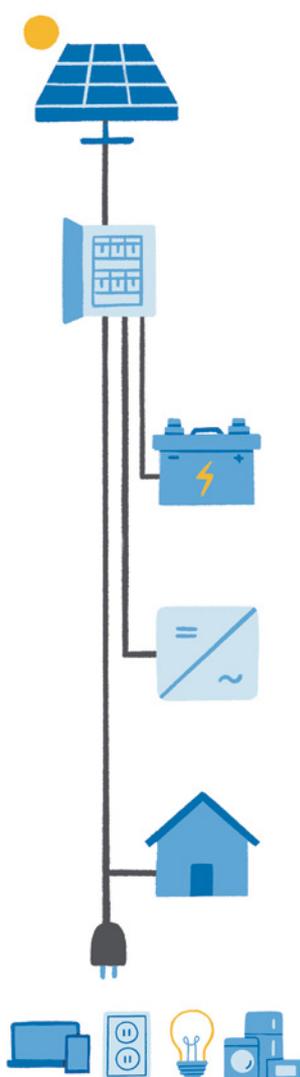
O consumo de energia elétrica para atendimento das necessidades básicas mínimas (segundo o MLA, necessidades básicas) do programa (uma lâmpada de LED, carregamento diário de um celular e uma geladeira de uma porta) é inferior a 45 kWh/mês. Já o padrão SIGFI 45 (MLA 45) atende, além das necessidades básicas mínimas do programa, ao uso de uma TV 14" e um notebook.

O padrão SIGFI 180 (MLA 180), com maior fornecimento, permite a inserção de mais equipamentos no domicílio (ventiladores, geladeira de duas portas, rede de internet, número de lâmpadas LED) aumentando o bem-estar dos residentes e ampliando sua capacidade de realizar atividades produtivas a partir de bombas d'água, freezers (para o armazenamento de produção alimentícia) e máquinas de costura (para a fabricação de roupas, artesanatos, etc.). Além disso, o padrão SIGFI 180 kWh/mês se assemelha ao consumo médio mensal de energia elétrica dos domicílios da região Norte, de 182 kWh/mês (EPE, 2022a).

**Figura 3.** Consumo de energia elétrica por tipo de padrão de atendimento do Programa MLA.



**Figura 4.** Características dos principais equipamentos utilizados no SIGFI.



**MÓDULO FOTOVOLTAICO**

Equipamento que gera energia elétrica em corrente contínua durante o dia, a partir de raios solares

**PAINEL ELÉTRICO**

Controle e segurança do sistema: módulo FV, bateria, equipamentos da unidade consumidora. Distribuição de energia para unidade consumidora.

**BATERIA**

Equipamento que armazena energia em corrente contínua gerada pelos módulos FV, para ser utilizada em períodos noturnos ou diurnos, quando há pouco sol.

**INVERSOR SOLAR**

Equipamento que converte a energia gerada nos módulos FV ou armazenada na bateria de corrente contínua em corrente alternada, para ser utilizada na unidade consumidora.

**UNIDADE CONSUMIDORA**

Pode ser uma residência, escola, posto de saúde, poço de água comunitário e centro comunitário de produção.

**USOS FINAIS**

Equipamentos que utilizam energia elétrica, como: lâmpadas, geladeira, freezer, ventilador, televisão, celular, computador.

Segundo dados da Aneel (2022a), até 2021, foram instalados 83.691 sistemas nas áreas de concessão de seis distribuidoras: COELBA, ENEL CE, ENEL GO, ENEL RJ, Equatorial MA e Equatorial PA. As duas últimas atendem tanto o programa LpT, quanto o MLA, sendo responsáveis por 21,5% das instalações (Tabela 2).

O padrão SIGFI representa 99% dos sistemas instalados, com predomínio do padrão de disponibilidade mensal de 13 kWh/mês, seguido pelo de 45 kWh/mês (IEI, 2022). A única distribuidora com MIGDI é a Equatorial MA, que implantou 73,3% dos sistemas nesse padrão (Aneel, 2022a).

Os sistemas instalados na região de concessão de distribuição da Amazônia Legal, caso das distribuidoras Equatorial MA e Equatorial PA, são da faixa de 45 a 180 kWh/mês, padrão de exigência do programa MLA, sendo a maioria no padrão SIGFI 45.

A distribuidora Equatorial MA implantou exclusivamente o padrão de 45 kWh/mês e a distribuidora Equatorial PA implantou 93% dos sistemas nesse mesmo padrão. Os 19.159 sistemas implantados por essas duas concessionárias representam 8% da meta do programa.

DISTRIBUIDORA	PADRÃO							TOTAL
	13	30	45	80	90	180	Outro	
Coelba BA	62.607	868	-	-	-	-	-	63.475
Enel CE	-	-	-	216	-	-	-	216
Enel GO	-	-	-	732	-	-	-	732
Enel RJ	-	-	-	109	-	-	-	109
Equatorial MA	-	-	1.198	-	-	-	-	1.198
Equatorial PA	-	-	17.537	-	124	145	155	17.961
<b>TOTAL</b>	<b>62.607</b>	<b>868</b>	<b>18.735</b>	<b>1.057</b>	<b>124</b>	<b>145</b>	<b>155</b>	<b>83.691</b>

**Tabela 2.** Padrão de disponibilidade mensal garantida dos sistemas SIGFI e MIGDI até 2021.

Fonte: Aneel (2022a).

## 2.1 - DIMENSIONAMENTO DA DEMANDA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS OFF-GRID PARA UNIVERSALIZAR O ACESSO À ENERGIA ELÉTRICA NA AMAZÔNIA LEGAL

Com o objetivo de estimar a quantidade de componentes dos sistemas fotovoltaicos necessária para alcançar as metas de universalização do programa MLA, realizou-se um cenário de inserção anual de sistemas *off-grid*. Para 2023, foi considerada a meta de atendimento definida pela Portaria N° 687/GM/MME (MME, 2022c) e detalhada pela Nota Técnica N°8/2022DPUE/SEE (MME, 2022b). Para os anos subsequentes, assumiu-se parcelas de atendimento decrescentes ao longo do período do programa, conforme mostra a Tabela 3<sup>5</sup>.

**Tabela 3.** Cenário de atendimento anual do programa MLA.

Ano	Meta anual	Unidades Consumidoras
2023	13%	29.461
2024	25%	53.843
2025	20%	43.844
2026	17%	37.268
2027	10%	21.922
2028	7%	15.345
2029	5%	10.961
2030	3%	6.577
TOTAL	100%	219.221

Adotou-se, como premissa, a utilização de três componentes nos sistemas fotovoltaicos: **módulo fotovoltaico, inversor solar e bateria**, considerando a utilização de **baterias íon-lítio e chumbo-ácido**<sup>6</sup> para cada cenário de atendimento.

O dimensionamento dos sistemas possibilitou a determinação da quantidade de componentes para cada padrão SIGFI:

- **SIGFI 45 kWh/mês:** quatro módulos fotovoltaicos; um inversor solar; três baterias de chumbo-ácido ou uma bateria de íon-lítio;
- **SIGFI 180 kWh/mês:** 15 módulos fotovoltaicos; um inversor solar; três baterias de chumbo-ácido ou uma de íon-lítio.

5. O Decreto N° 11.111/2022, que prorrogou o prazo do programa MLA, não estabelece metas anuais e locais de atendimento (Brasil, 2022b).

6. A metodologia de dimensionamento dos sistemas e as características de cada um dos componentes pode ser analisada no Anexo A.

Considerou-se uma vida útil de dez anos para as baterias de íon-lítio e quatro anos para as baterias de chumbo-ácido. Com isso, as reposições das baterias de chumbo-ácido seriam anuais a partir do ano de 2027<sup>7</sup>.

Quanto aos módulos fotovoltaicos, foi considerada uma vida útil máxima de 25 anos. Assim, os primeiros módulos implementados chegarão ao fim da vida útil em 2048 e, portanto, considerou-se a substituição dos sistemas a partir desta data.

Aplicando o dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos às metas de universalização do MLA, foi possível estimar a utilização de **mais de três milhões de equipamentos ao longo da vida útil dos sistemas para o cenário SIGFI 45 com bateria de íon-lítio, e de 12 milhões de equipamentos para o cenário SIGFI 180 com bateria de chumbo-ácido**, conforme detalhada na Tabela 4.

**Tabela 4.** Número de componentes de sistema fotovoltaicos necessários.

COMPONENTES		TOTAL
Módulo FV	45 kWh/mês	1.753.770
	180 kWh/mês	6.576.637
Inversor		784.811
Bateria de Chumbo-Ácido		5.435.991
Bateria de Íon-Lítio		784.811

A implementação desses componentes não ocorrerá de maneira imediata. Dessa forma, a partir das metas de universalização do programa, a quantidade de componentes dos sistemas fotovoltaicos foi distribuída ao longo do tempo, conforme a Figura 5.



**Figura 5.** Distribuição anual da inserção de componentes para os SIGFI 45 e 180.

7. A bateria de chumbo-ácido tem vida útil média de quatro a sete anos (Dufo-López & Bernal-Agustín, 2015); já a bateria de lítio possui vida útil média de oito a 13 anos (Stroe et al., 2017). As condições de operação, como temperatura e número de ciclos de recarga e descarga, têm grande impacto na vida útil desses equipamentos. Os fabricantes garantem que os módulos FV geram mais ou igual a 80% da capacidade nominal durante 20 anos. No mesmo período, as baterias do tipo chumbo-ácido precisam ser substituídas de cinco até dez vezes e as de lítio de três vezes.



**FV GERAM MAIS OU IGUAL A 80% DA CAPACIDADE NOMINAL DURANTE 20 ANOS. NO MESMO PERÍODO, AS BATERIAS DO TIPO CHUMBO-ÁCIDO PRECISAM SER SUBSTITUÍDAS DE CINCO ATÉ DEZ VEZES E AS DE LÍTIO DE TRÊS VEZES.**

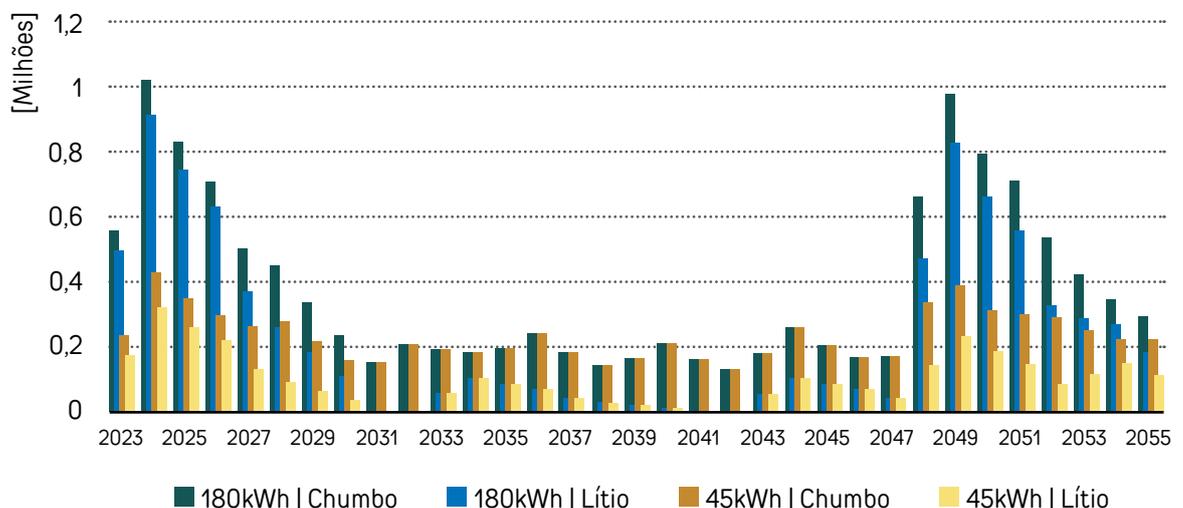
Embora o módulo fotovoltaico seja responsável pela maior quantidade de componentes, sua inserção ao longo do tempo é restrita. A inserção dos módulos é predominante até 2026, para o SIGFI 45, e até 2030, para o SIGFI 180, com picos de inserção que ultrapassam **200 e 800 mil componentes**, respectivamente, no segundo ano de vigência do programa. Em ambos os casos, a substituição dos módulos existentes se repete a partir de 2048, quando inicia um novo pico.

Por sua vez, a bateria de chumbo-ácido é o único componente que exige constante reposição dada a sua menor vida útil em relação aos outros componentes, assumindo proporção predominante, por vezes exclusiva, entre os anos de 2031 e 2047. Ao longo de todos os anos, **sua inserção supera 100 mil componentes e alcança 200 mil** em sete anos diferentes.

Tanto a bateria de íon-lítio quanto o inversor coincidem em número de componentes e vida útil, o que explica o comportamento idêntico em distribuição e proporção dentro do cenário. Ou seja, ambos apresentam apenas quatro períodos de inserção que não ultrapassam o limite de 100 mil componentes entre os anos de 2023 e 2030 e, de 2033 e 2039.

A Figura 6 mostra a quantidade de equipamentos de sistemas fotovoltaicos para cada cenário. Os sistemas que utilizam bateria de íon-lítio não exigem reposição de seus componentes nos anos de 2031, 2032, 2041 e 2042. De modo contrário, a reposição é permanente em sistemas com bateria de chumbo-ácido. Como demonstrado na Tabela 4, sistemas que fornecem mais energia necessitam de mais módulos, o que explica sua predominância em relação aos sistemas de menor energia.

**Figura 6.** Quantidade de equipamentos por tipo de SIGFI ao longo do cenário.





**CASO O ATENDIMENTO DE TODAS AS 219.221 UNIDADES CONSUMIDORAS DO PROGRAMA MLA SEJA FEITO POR SISTEMAS INDIVIDUAIS, ESSE NÚMERO REPRESENTARIA 16% DA QUANTIDADE DE SISTEMAS ATUALMENTE INSTALADOS EM TODO O PAÍS**

Considerando o padrão **SIGFI 45**, em 2030 a capacidade instalada do programa MLA **atingirá 363 MWp**. Para o padrão **SIGFI 180**, a capacidade será de **1.381 MWp**. Trata-se de um montante significativo quando se compara à capacidade instalada atualmente nos vários estados brasileiros, como mostra a Figura 7.

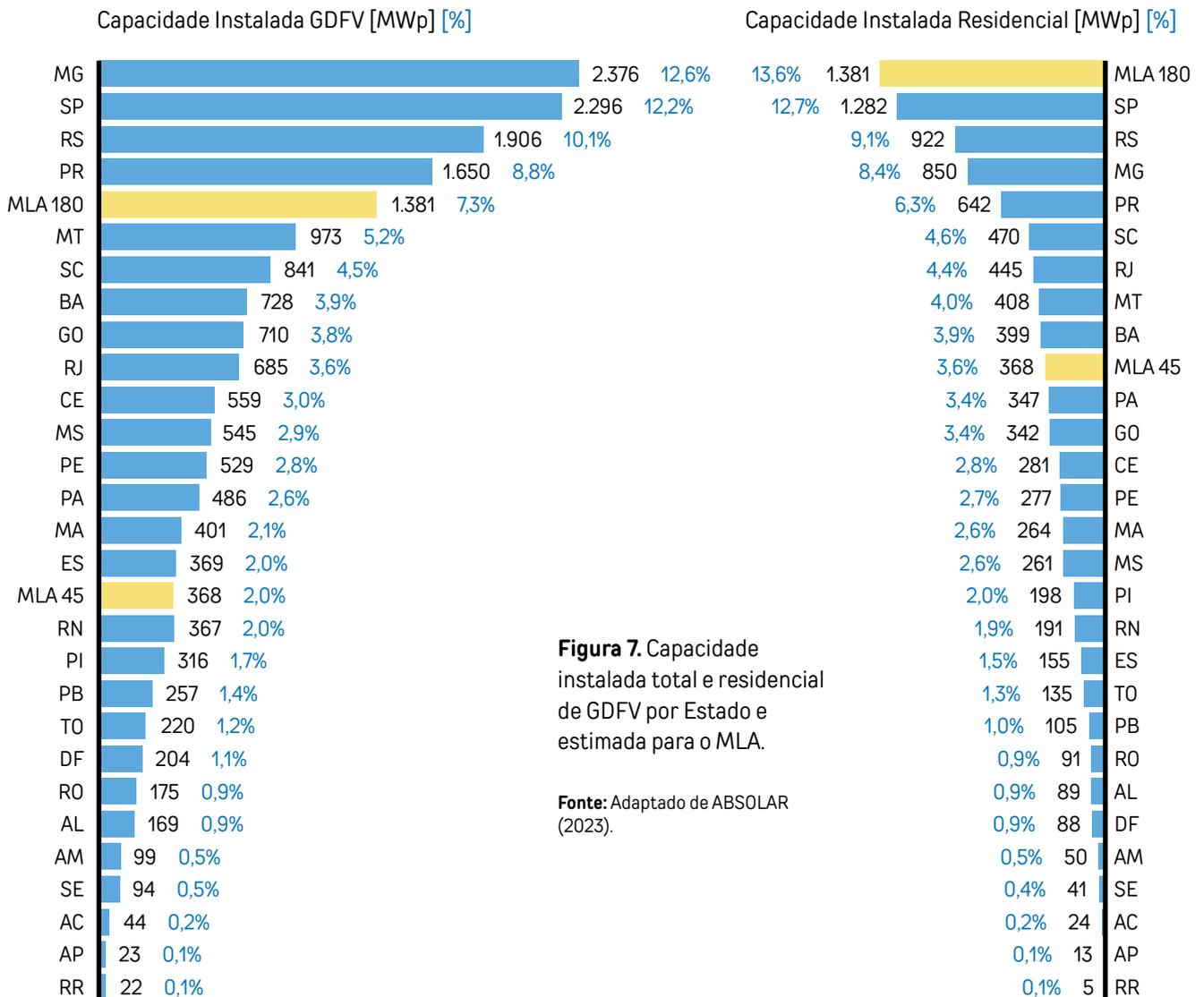
Por exemplo, **aplicar o padrão SIGFI 180 significa estabelecer uma capacidade superior ao total de Geração Distribuída Fotovoltaica (GDFV) implantado no estado do Mato Grosso (972,9 MWp)**, quinto Estado com maior capacidade instalada de eletricidade do país. Analisando apenas os sistemas GDFV residenciais, **o programa MLA exige uma capacidade instalada superior ao do estado de São Paulo**, que apresenta o maior número de sistemas residenciais GDFV do país.

Quanto ao atendimento pelo padrão SIGFI 45, o programa exigiria uma capacidade instalada superior à verificada atualmente em 12 estados brasileiros ou superior a 19 Estados, no caso de sistemas residenciais (Figura 7). Ou seja, independentemente do padrão de instalação dos sistemas, **a capacidade instalada exigida para atender a 100% das unidades consumidoras posicionaria o programa MLA como um dos maiores indutores do mercado de sistemas fotovoltaicos do país.**

Em relação ao setor residencial, de um total de 1,289 milhão de sistemas instalados no Brasil, a Região Sudeste detém a maior capacidade instalada e números de sistemas, 2.731 MW e 473 mil, respectivamente. As Regiões Sul e Nordeste apresentam números semelhantes de capacidade, 2.035 MWp e 1.845 MWp, e de número de sistemas instalados, 316 mil e 265 mil, respectivamente, enquanto a Região Norte tem os menores números do setor, 665 MW e 78 mil sistemas (Figura 8).

Caso o atendimento de todas as 219.221 unidades consumidoras do programa MLA seja feito por sistemas individuais, esse número **representaria 16% da quantidade de sistemas atualmente instalados em todo o país**, superior à capacidade instalada e ao número de sistemas GDFV residenciais das Regiões Centro-Oeste e Norte (região de atuação do MLA).

## 2. DESAFIOS

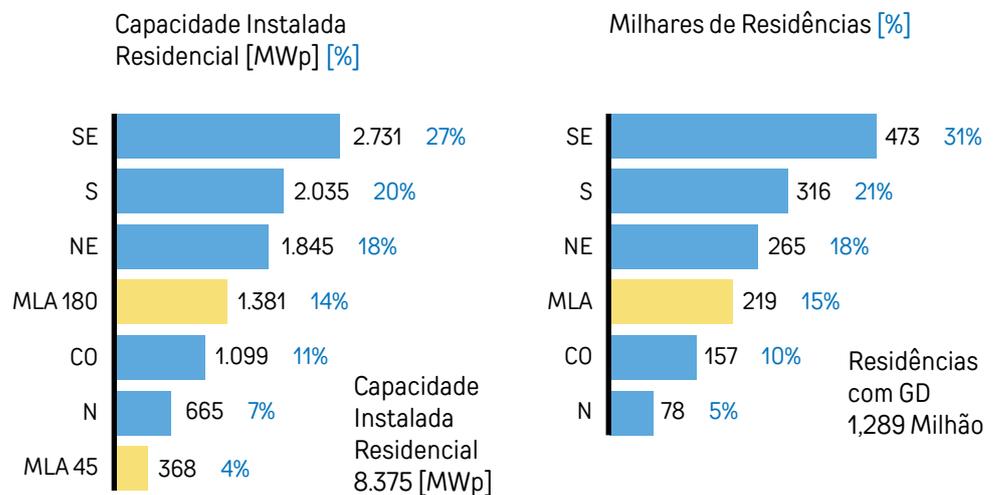


**Figura 7.** Capacidade instalada total e residencial de GDFV por Estado e estimada para o MLA.

Fonte: Adaptado de ABSOLAR (2023).

**Figura 8.** Capacidade instalada e número de sistemas GDFV residenciais por região - 2022.

Fonte: Adaptado de ABSOLAR (2023).



## 2.2 – CADEIA DA INDÚSTRIA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL

A cadeia de valor da indústria solar fotovoltaica inclui todos os processos de extração e beneficiamento da matéria-prima, produção dos equipamentos e componentes, até a desativação dos sistemas instalados e a disposição final dos resíduos, assim como todos os serviços correlatos como engenharia, securitização, regulação, realizados por diferentes atores da esfera pública, privada e da sociedade civil.

Conforme ilustra a Figura 9, a participação dos atores pode se dar de forma direta – fabricantes, fornecedores, distribuidores, integradores, concessionárias, consumidores e agentes reguladores –, ou indireta, como é o caso de instituições de pesquisa, organizações da sociedade civil e agentes financiadores.

**Figura 9.** Principais etapas da cadeia solar e atores envolvidos.





HÁ MAIS DE 50  
INSTITUIÇÕES FINANCEIRAS  
— ENTRE BANCOS  
PÚBLICOS, PRIVADOS,  
AGÊNCIAS DE FOMENTO —,  
QUE OFERECEM  
FINANCIAMENTO PARA  
A IMPLANTAÇÃO DE  
SISTEMAS FV NO PAÍS

Atualmente, o Brasil conta com sete fábricas (montadoras) de módulos fotovoltaicos com capacidade anual de montagem de até 1,2 GW por ano<sup>8</sup>. Onze fábricas (montadoras) de inversor solar, nove, segundo o FINAME. E três fábricas de bateria do tipo estacionária que produzem, principalmente, baterias do tipo chumbo-ácido, e uma, segundo o Finame (ABSOLAR, 2023; BNDES, 2022b; Greener, 2021). **Essas unidades fabris estão concentradas no eixo sul do país, 75% do total, enquanto a Região Norte apresenta 6% das empresas da cadeia solar** (Montenegro et al., 2021; Ramos et al., 2018).

No Brasil, a cadeia da indústria e serviços solar emprega 720 mil trabalhadores (ABSOLAR, 2023), concentrados principalmente na de serviços, já que o Brasil importa a maioria dos equipamentos utilizados. Dentro da cadeia de serviços, há mais de 26 mil empresas integradoras<sup>9,10</sup>, empregando em média 7,4 trabalhadores por empresa (Greener, 2022). Outro setor com destaque são as 87 empresas de fornecimento de kits solares<sup>11</sup>, que disponibilizam para o mercado 220 opções de sistemas e também estão concentradas na Região Sudeste do país (ABSOLAR, 2023; BNDES, 2022b).

Ainda sobre a cadeia de serviços, há mais de 50 instituições financeiras — entre bancos públicos, privados, agências de fomento —, que oferecem financiamento para a implantação de sistemas FV no país (Greener, 2022). Destacam-se os bancos tradicionais e o BNDES, principal agente financeiro que, por meio dos seus programas de crédito (ABC Manejo de Resíduos, Finame, Fundo Clima, Moderagro, Pronaf, entre outros), financia a produção e a comercialização de equipamentos novos da cadeia solar (BNDES, 2022a).

---

8. Dados baseados em informações de sites especializados (ABSOLAR, 2023; BNDES, 2022b; Canal Energia, 2022).

9. Empresas que fazem a ponte entre a distribuidora de equipamentos e o cliente final fornecendo projetos, materiais, ferramentas, instalações e manutenções do sistema.

10. O custo médio dos serviços de integração GDFV no Brasil é de 1,67 R\$/Wp; no caso de sistemas *off-grid* na região da Amazônia, esse custo pode alcançar 5,09 R\$/Wp.

11. Sistema FV completo para instalação.

### 2.3 – CADEIA DE ARMAZENAMENTO

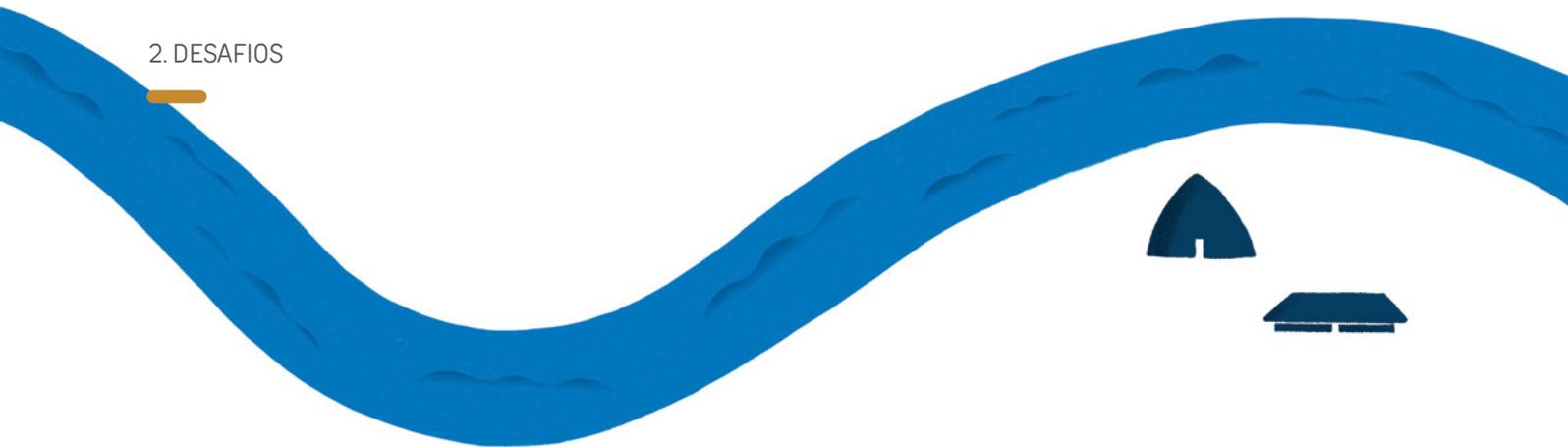
O armazenamento de energia utiliza diferentes tecnologias e escala (capacidade instalada) para gerenciar o fornecimento de energia para distintos mercados e consumidores – reserva de capacidade; prestação de serviços ancilares; armazenamento de energia de sistemas *on-grid* e *off-grid*; setores de geração, transmissão e distribuição; consumidores residenciais, comerciais etc. (ABSOLAR, 2021).

No caso do atendimento de regiões a partir de sistemas *off-grid*, como ocorre no programa MLA, o armazenamento pode viabilizar a substituição dos geradores tradicionais a diesel, a gasolina e a óleo combustível por sistemas de geração a partir de fontes renováveis variáveis, permitindo o consumo de eletricidade armazenada com até 48 horas de autonomia quando os sistemas de geração não estão operantes e, ao mesmo tempo, reduzindo as emissões de poluentes e gases de efeito estufa (ANEEL, 2020).

Assim como a produção da cadeia solar, a cadeia das baterias estacionárias está integrada globalmente, possuindo diversos estágios intermediários de produção e serviços. Esses estágios se iniciam com a extração e o beneficiamento dos minérios e o

**Figura 10.** Principais etapas da cadeia de armazenamento e atores envolvidos.





refino para obtenção de matérias-primas de pureza específicas. Depois, passam pela síntese dos materiais para produção de cátodo e ânodo, principais componentes das baterias (IEA, 2022a), e são finalizados com as etapas de comercialização, integração com equipamentos de uso final (etapa que envolve serviços e produção de bens, como veículos elétricos), logística reversa, tratamento e reciclagem dos resíduos. Todas essas etapas envolvem diferentes atores e setores globais da economia e da sociedade (Figura 10).

O armazenamento de energia elétrica de sistema *off-grid* no Brasil é dominado por baterias do tipo chumbo-ácido, com tecnologia de produção e de serviços amplamente disponíveis no país e, possivelmente, utilizado nos mais de 83 mil sistemas SIGFI e MIG-DI implantados até 2021. A Moura é a maior fabricante desse tipo de tecnologia na América do Sul (Moura, 2022a), com unidades de produção na região Nordeste (Pernambuco) e domínio dos processos de logística reversa, reciclagem e reuso dos materiais, **com taxa anual de reciclagem superior a 99% ao ano** (Moura, 2022b).

As baterias de chumbo-ácido têm menor preço, baixa complexidade de implantação, dispensam a necessidade de controle da temperatura de operação e contam com uma cadeia de reciclagem madura, ao contrário das baterias de íon-lítio. Por outro lado, o uso da bateria de íon-lítio é positivo quando se busca maior durabilidade, maior número de ciclos, menor tempo de recarga e maior de descarga e carregamento, aumentando a vida útil e reduzindo a necessidade de substituições e manutenções (**Anexo B**).

Quanto ao armazenamento de energia a partir de baterias de íon-lítio, o mercado ainda é incipiente no Brasil, com perspectiva de crescimento a partir de 2023. Ainda são poucos os sistemas em operação, e a maioria deles é fruto de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) decorrentes da Chamada Estratégica 21 “Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas de Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro” da Aneel, que recebeu interesse de 96 agentes do setor em executar ou financiar projetos de pesquisa no tema (Aneel, 2022b).



**DIFERENTEMENTE DA CADEIA SOLAR, NÃO HÁ NO PAÍS UMA BASE DE DADOS E INFORMAÇÕES ESTRUTURADAS SOBRE NÚMERO, POTÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE BATERIAS INSTALADAS COM A FUNÇÃO DE ARMAZENAR ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO.**

Ao longo desta pesquisa, o IEMA realizou diversas entrevistas e reuniões com representantes de empresas da cadeia solar e de armazenamento de energia (**Anexo C**), que relataram suas experiências de implantação de sistemas *off-grid* na região da Amazônia Legal. De acordo com os entrevistados, as baterias de chumbo-ácido dominam as aplicações de sistemas de armazenamento de energia, enquanto baterias do tipo íon-lítio limitam-se a projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D).

Diferentemente da cadeia solar, não há no país uma base de dados e informações estruturadas sobre número, potência e distribuição de baterias instaladas com a função de armazenar energia elétrica em sistemas híbridos de geração. Esse gargalo dificulta o desenvolvimento de programas de acesso à energia elétrica em sistemas isolados e remotos, bem como a cadeia de serviços de sistemas integrados à rede.

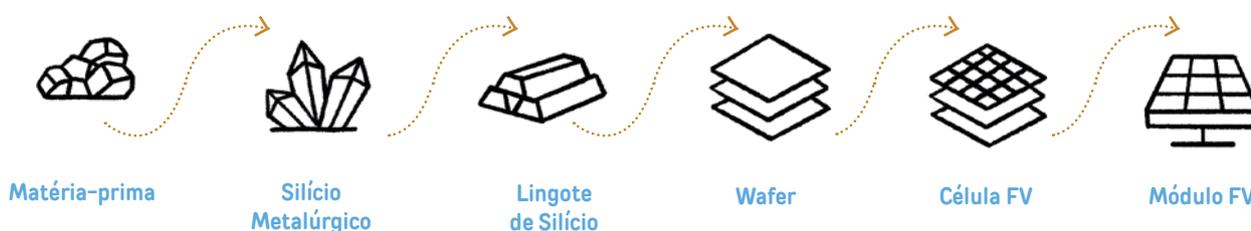
É crescente a discussão sobre o uso de baterias de íon-lítio de segunda vida. Esta se aplica em casos de sistemas cuja capacidade de recarga rápida está esgotada, mas que ainda são úteis para a aplicação estacionária, que não exige carregamento rápido. Por exemplo, as baterias de veículos elétricos (VE) mantêm 80% da sua capacidade inicial de fornecimento de energia após o fim do seu carregamento rápido (Cazzola, 2018), tornando-as elegíveis para uso em várias aplicações. Uma delas é o armazenamento de energia gerada por fontes renováveis, tanto em escala residencial quanto de utilidade pública (Kotak et al., 2021). As baterias de VE para uso doméstico podem ser vantajosas em termos de preço, no longo prazo. O custo dessa bateria é estimado em aproximadamente 20% do custo de baterias novas, tendo um tempo de recuperação de investimento que varia de 8 a 14 anos (Al-Wreikat et al., 2022).

Contudo, sua aplicação em sistemas isolados e remotos da Amazônia gera incertezas à medida que possuem vida útil menor do que as baterias novas (Mathews et al., 2020) e podem apresentar problemas técnicos no curto prazo (Hohmann et al., 2022). Seu custo é alto quando comparado ao das baterias veiculares tradicionais (chumbo-ácido) e do sistema de geração fotovoltaica (Reinhardt et al., 2019), com o agravante de se destinar resíduos de uma cadeia, como a de EVs, para atender uma região ampla e sensível, como a Amazônia. Devido à disposição desses resíduos em locais sem controle, os impactos ambientais severos são potencializados, uma vez que a região possui sistemas distribuídos em municípios com déficit de estruturas, de fiscalização e de acesso a serviços de saneamento, como coleta e destinação de resíduos sólidos.

## 2.4 – DEPENDÊNCIA DO MERCADO FOTOVOLTAICO INTERNACIONAL

### MÓDULO FOTOVOLTAICO

Os módulos fotovoltaicos de silício dominam o mercado mundial (Guo et al., 2021). A China responde por 90% da cadeia de extração e processamento da matéria-prima e da produção do silício metalúrgico, lingote e wafer. Em relação à cadeia de produção dos módulos FV (Figura 11), até 2005, a totalidade do silício metalúrgico utilizado na fabricação dos módulos fotovoltaicos em todo o mundo era produzida nos EUA, Alemanha e Japão (IEA, 2022b).

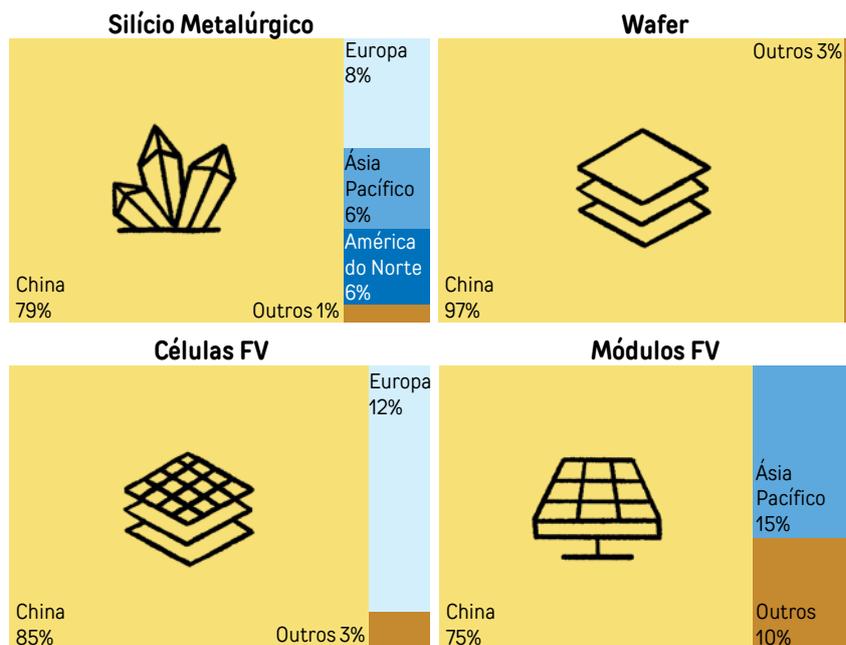


**Figura 11.** Fluxo da cadeia de produção do módulo FV.

Atualmente, **a China produz 79% desse material**, 97% dos *wafers*<sup>12</sup>, 85% das células fotovoltaicas e **75% dos módulos fotovoltaicos**, sendo uma única fábrica responsável por 4% da produção total. Também é o principal produtor dos componentes dos módulos FV, como vidro, EVA, *junction box* e *backsheet* (IEA, 2022b). Além da China, apenas países asiáticos como Malásia, Vietnã, Coreia do Sul e Tailândia são capazes de atender às suas demandas internas (Figura 12). Todos os demais dependem da importação da China, como União Europeia (84%), EUA (77%) e Índia (75%) (IEA, 2022b).

O comércio internacional de tecnologia fotovoltaica, em 2021, somou US\$ 40 bilhões, impactando as balanças comerciais dos países que participam dessa cadeia. Do lado da China, as exportações representaram 6% do seu superávit comercial. Quanto ao Brasil, o terceiro maior importador da China, atrás da União Europeia (17 GW) e da Índia (8 GW) (Infolink Consulting, 2022), essas importações reduziram em 12% o seu superávit comercial, com acumulado de US\$ 20 bilhões em cinco anos (IEA, 2022b).

12. *Wafers* são lâminas de silício, oriundas do corte do lingote de silício, que recebem barramentos (condutores elétricos) para formarem as células fotovoltaicas.



**Figura 12.** Participação da China na cadeia de produção dos módulos fotovoltaicos.

Fonte: Adaptado de IEA (2022b).

Para expressar essa dimensão, **em 2021, 3,8% dos módulos FV utilizados em novas instalações foram produzidos nacionalmente (Greener, 2021), complementados pela importação de 9,7 GW de módulos fotovoltaicos para atender ao mercado interno (Greener, 2022).** Já a importação de **inversores solares foi de cerca de 9,5 GW**, embora a produção nacional seja maior que a de módulos FV (Greener, 2021). Dentro da cadeia de produção, apenas as estruturas e componentes elétricos e de segurança são majoritariamente fabricados no país (Greener, 2021; Ramos et al., 2018).

Visando estimular a indústria nacional e forçar a implantação de fábricas e montadoras de equipamentos, o Brasil adota imposto de importação para equipamentos importados; 12% para módulos fotovoltaicos, 14% para inversores e 18% para baterias, mais adicional de 18,7% para nacionalizá-los (ABSOLAR, 2021; Greener, 2022), fornecendo, também, empréstimos com juros subsidiados via BNDES para a produção e comercialização de novos equipamentos (BNDES, 2022a).

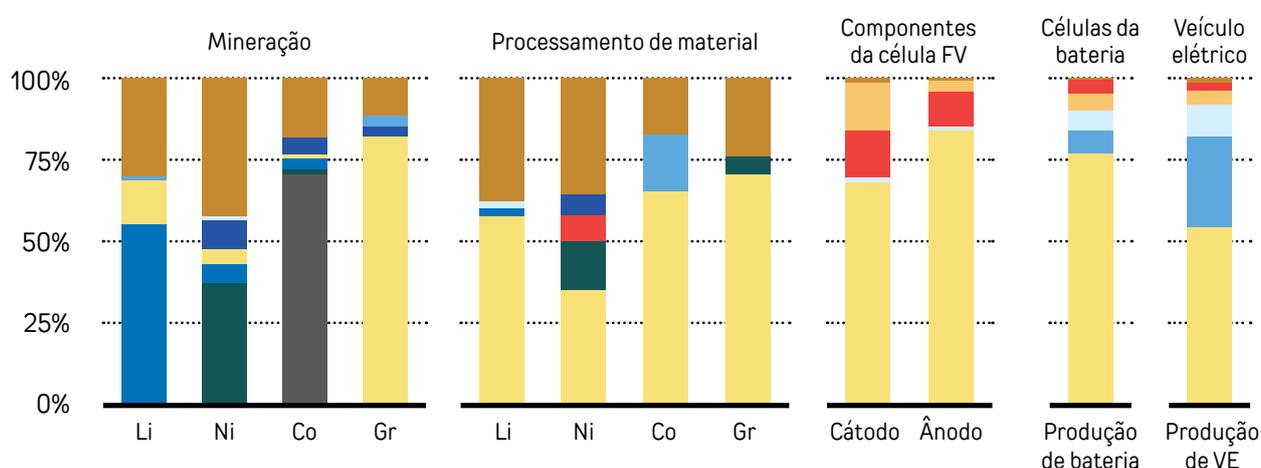
No entanto, essa política não viabilizou a implantação de fábricas de sistemas FV para atender a escala de consumo no país. É habitual a implantação de unidades de montagem, que importam todos os componentes, incluindo equipamentos finalizados, deixando para essas unidades a montagem final: empacamento, condicionamento e regularização das normas nacionais e de nacionalização do produto<sup>13</sup>.

## BATERIAS ESTACIONÁRIAS

**A China é o país que mais investe na indústria de baterias**, sendo o maior produtor e fornecedor deste tipo de produto. **Responde por 75% da produção das baterias de íon-lítio**, 70% da produção de cátodos e 85% de ânodos (ambos são os principais componentes das baterias) e mais da metade da capacidade de processamento e refino de lítio, cobalto e grafite (Figura 13). O país só não é hegemônico na etapa de mineração das matérias-primas. Ademais, apenas três fabricantes responderam por 65% da produção global de 2021, CATL (China), LG Energy Solution (Coreia) e Panasonic (Japão) (IEA, 2022a).

**Figura 13.** Distribuição da cadeia produtiva de baterias - %.

Fonte: (IEA, 2022a).



Embora as unidades de fabricação das baterias e de componentes como cátodos, ânodos e células possam ser construídas em menos de quatro anos, as etapas de extração e beneficiamento de alguns tipos de matérias-primas, como níquel e lítio, requerem investimentos intensivos em prospecção e exploração de mais de uma década para atingir maturidade e escala industrial (IEA, 2022c). Ou seja, o setor exige políticas públicas de estado para se desenvolver com investimentos e capacitação de trabalhadores contínuos, em horizontes de médio e longo prazos.

**13.** O período de implantação de fábricas em países cuja industrialização já é desenvolvida supera os dois anos, exige investimentos entre US\$ 20 e US\$ 60 milhões por GW de módulos produzidos anualmente, gerando de 600 a 900 postos de trabalho para cada GW produzido (IEA, 2022b). Para ser competitiva, demanda uma política de Estado focada em programas de capacitação de trabalhadores e coordenada aos investimentos de ampliação e implantação de unidades de produção.

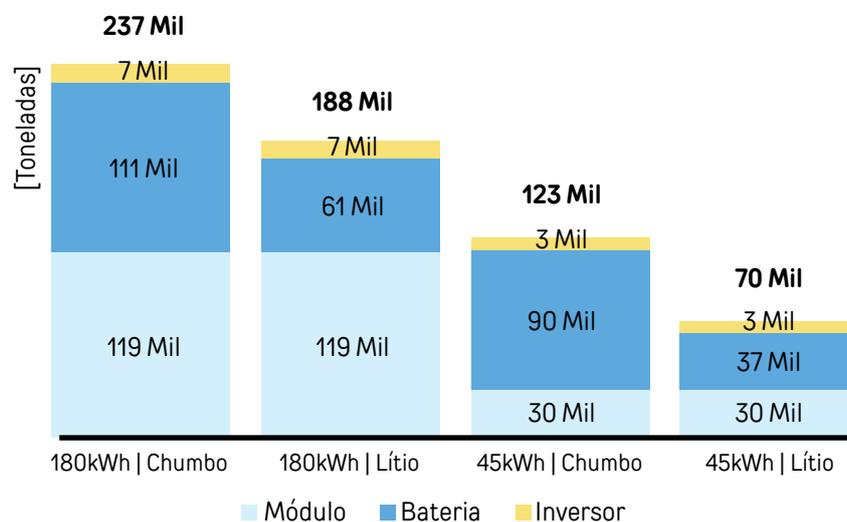
## 3. AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS

### 3.1 – DIMENSIONAMENTO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NO ÂMBITO DO MLA

#### MASSA E COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS GERADOS NO ÂMBITO DO PROGRAMA MLA

A geração de resíduos foi estimada a partir do dimensionamento da demanda de sistemas *off-grid* para o atendimento das unidades consumidoras do programa MLA, apresentado no capítulo 2.1. Essa estimativa foi obtida aplicando aos valores da massa dos componentes dos sistemas (Anexo A) os resíduos dos módulos fotovoltaicos, baterias e inversores gerados ao longo de toda a vida útil dos sistemas até 2055. O resultado é mostrado na Figura 14.

Figura 14. Massa acumulada de resíduos até 2055 – toneladas



No final da vida útil dos sistemas implantados no programa, seriam produzidos entre 71 e 237 mil toneladas de resíduos. A quantidade de resíduos dos sistemas com bateria do tipo chumbo-ácido aumenta significativamente em ambos os sistemas, com uma variação de 74%, no de menor porte, e de 26%, no de maior porte, em comparação aos sistemas que utilizam a bateria de íon-lítio. Sistemas maiores, que demandam maior quantidade de

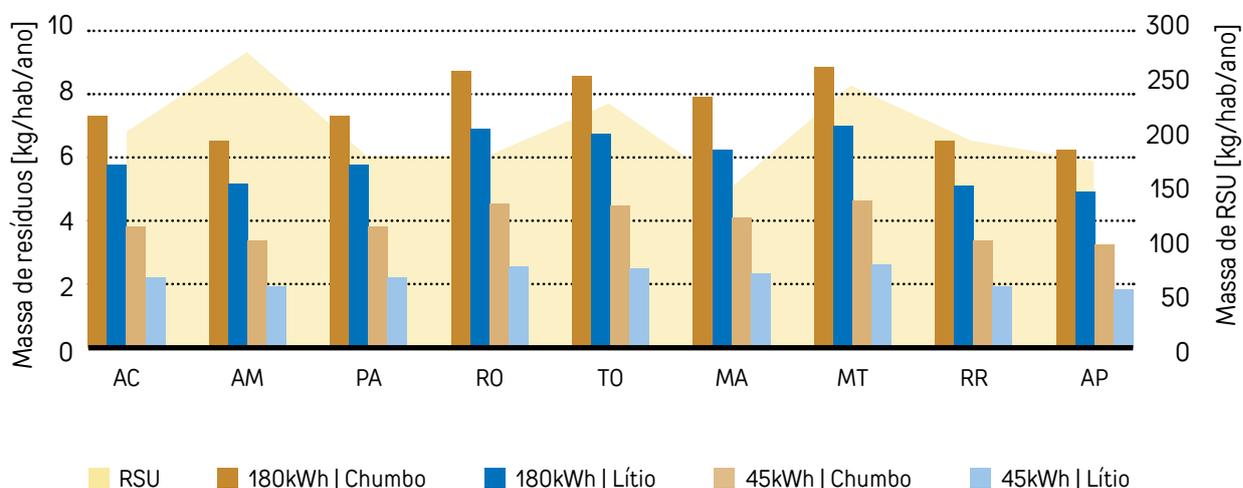
energia, obviamente necessitam de equipamentos mais pesados, o que explica a diferença entre os resíduos totais acumulados entre ambos os sistemas.

Em 2021, os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, que incluem o módulo fotovoltaico, as pilhas e baterias totalizaram 3.717 toneladas em 8.682 pontos de coletas voluntários espalhados pelo país (Abinee, 2022). Dividindo o montante de resíduos gerados ao longo do programa MLA pelo período considerado nos cenários, o SIGFI 180 com bateria de chumbo-ácido gera cerca de sete mil toneladas por ano, correspondendo a quase que o dobro dos resíduos eletrônicos coletados no país em 2021. Já os SIGFI 45 com bateria de íon-lítio correspondem a 54% da massa destes equipamentos.

A distribuição das 71 a 237 mil toneladas de resíduos pelo número de habitantes<sup>14</sup> das 219 mil unidades consumidoras a serem contempladas pelo programa MLA, revela uma proporção distinta de resíduos entre os estados da Amazônia Legal. A Figura 15 mostra a relação da geração de resíduos de forma anualizada por habitante e os resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados anualmente em cada estado em 2019<sup>15</sup> (SINIR+, 2020b).

**Figura 15.** Massa anual de resíduos por habitante e por Estado - kg/hab/ano.

Fonte: (SINIR+, 2020b).



14. A proporção de habitantes foi estimada pela razão entre a população e o número de domicílios de cada estado (IBGE, 2017).

15. Inicialmente, o resíduo por unidade consumidora foi calculado pela razão entre o total de resíduos e o total de UCs. Multiplicando este valor pelas UCs de cada estado, obteve-se o valor correspondente ao resíduo por UC e por estado. Assim, dividindo-o pelo produto entre habitantes e unidades consumidoras de cada estado, obteve-se os resíduos por habitante e por estado. Dividindo este resultado por 32 anos, tem-se o valor anualizado de resíduos por habitante e por estado.



**OS ESTADOS DO ACRE, AMAPÁ E AMAZONAS TERIAM A MENOR QUANTIDADE DE RESÍDUOS ANUAL POR HABITANTE GERADOS PELO PROGRAMA MLA EM COMPARAÇÃO COM OS OUTROS ESTADOS. MATO GROSSO, RONDÔNIA E TOCANTINS, POR SUA VEZ, SERIAM OS MAIORES GERADORES DE RESÍDUOS POR HABITANTE.**

Considerando a totalidade de resíduos gerados ao longo do programa MLA, dividida linearmente ao longo dos 32 anos analisados, **os estados do Acre, Amapá e Amazonas teriam a menor quantidade de resíduos anual por habitante gerados pelo programa MLA** em comparação com os outros estados. **Mato Grosso, Rondônia e Tocantins, por sua vez, seriam os maiores geradores de resíduos por habitante.**

O Pará, detentor do maior número de unidade consumidoras a serem atendidas pelo programa MLA, geraria 2,2 kg/hab/ano com sistemas SIGFI 45 à bateria de íon-de-lítio; para o sistema SIGFI 180 com bateria de chumbo-ácido, o valor aumentaria para 7,3 kg/hab/ano. Comparando com a geração Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) por habitante em 2019, 38 kg/hab/ano, **os resíduos gerados anualmente, ao longo do programa, correspondem de 1% a 4% dos RSU produzidos no estado a cada ano.**

Por outro lado, o Mato Grosso, que tem a menor meta de atendimento do programa, apresenta a maior quantidade de resíduos gerados anualmente por habitante, pois registra o menor número de habitantes por unidade consumidora. Estima-se a geração de 2,7 kg/hab/ano nos SIGFI 45, com bateria de íon-lítio, e 8,9 kg/hab/ano nos SIGFI 180, com bateria de chumbo-ácido. Em 2019, o estado do Mato Grosso gerou 246 kg/hab/ano de RSU.

Embora os resultados dos quatro cenários correspondam, em média, a 4% dos RSU dos estados da Amazônia Legal, provavelmente serão alocados em regiões urbanas com infraestrutura de saneamento, principalmente em suas capitais ou em outras regiões do país. Esses estados deverão se preparar para remover os resíduos distribuídos em seus vastos territórios e receber um aumento significativo de resíduos perigosos e tóxicos em suas estações de processamento, reciclagem e destinação final de resíduos.

É importante destacar que **os valores de geração de resíduos estão subestimados** por desconsiderar condutores elétricos, controladores de carga, estruturas metálicas, fixadores e outros componentes, que aumentariam ainda mais a massa total de resíduos. Mesmo assim, as limitações dos cenários não ocultam **a expressiva geração de resíduos no âmbito do programa MLA, que seria superior à coleta anual de equipamentos eletroeletrônicos em todo país, com a ressalva de que a maioria da coleta é realizada na Região Centro-Sul.**

## MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Utilizando dados de Latunussa et al (2016), que realizou uma amostragem com cerca de 1.000 módulos fotovoltaicos para determinar a proporção da massa dos seus componentes, estimou-se a composição e respectivas quantidades dos resíduos gerados ao longo do programa MLA, cujos resultados são apresentados na Tabela 5. É importante destacar que vidro e moldura de alumínio respondem por 88% dos resíduos gerados pelos módulos fotovoltaicos.

**Tabela 5.** Proporção e massa de módulo fotovoltaico c-Si.

COMPOSIÇÃO	%	RESÍDUO [t]	
		45 kWh	180 kWh
Vidro	70	22.266	83.549
Moldura de Alumínio	18	5.726	21.484
EVA	5,1	1.622	6.087
Célula solar (c-Si)	3,65	1.161	4.356
Backsheet (PVF)	1,5	477	1.790
Cabos (Cu e polímeros)	1	318	1.194
Condutor interno (Al)	0,53	169	633
Condutor interno (Cu)	0,11	36	136
Ag	0,053	17	63
Outros metais (Sn, Pb)	0,053	17	63
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>31.854</b>	<b>119.356</b>

## BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

O dimensionamento da composição das baterias de íon-lítio baseou-se em Aranha et al (2017), que segrega a bateria em quatro frações principais: (i) plásticos; (ii) placas; (iii) pós; e (iv) outros, com indicação das respectivas proporções em massa. Os pós são materiais ativos presentes no alumínio e no cobre. Outros incluem materiais como parafusos, arruelas, conexões e o eletrólito líquido.

Os resíduos das baterias de íon-lítio para atendimento das unidades consumidoras do programa MLA podem alcançar entre 37 e 61 mil toneladas (Tabela 6).

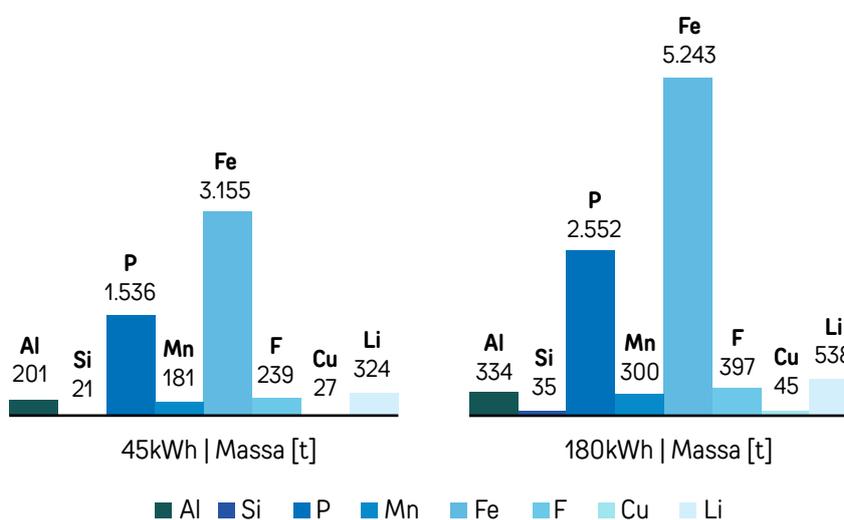
**Tabela 6.** Proporção e massa de resíduos de baterias de íon-lítio.

FRAÇÕES	FONTE	%	RESÍDUO [t]	
			45 kWh	180 kWh
Plásticos	Carcaça	18	6.617	10.995
	Invólucro	6	2.206	3.665
Placas	Catódica (Al)	6	2.206	3.665
	Anódica (Cu)	10	3.676	6.108

Pós	Catódico	28	10.294	17.103
	Anódico	15	5.515	9.163
Outros	Eletrólito	17	6.250	10.384
	Perdas			
<b>TOTAL</b>			<b>36.763</b>	<b>61.084</b>

Aranha et al (2017) também identificou a proporção de elementos contida nos pós – catódico e anódico – das baterias de íon-lítio. Assim, calculou-se a quantidade de metais residuais provenientes de todas as baterias de íon-lítio necessárias para atender o programa MLA até 2055. O ferro (Fe), com um volume entre 3.155 e 5.243 toneladas e o fósforo (P), com um volume entre 1.536 e 2.552 toneladas, são os elementos com maior representatividade em massa (Figura 16).

**Figura 16.** Potencial de massa de resíduos de baterias de íon-lítio aplicados ao MLA – toneladas.



### BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

Os principais componentes das baterias de chumbo-ácido são frações orgânicas como separadores de placas, tampas, caixa da bateria; inorgânicas como terminais de chumbo, conectores positivos e negativos com sais e óxidos de chumbo; e o eletrólito, diluído em ácidos (Licco, 2000).

A proporção dos constituintes principais das baterias de chumbo-ácido e as respectivas quantidades em massa são apresentados na Tabela 7, tanto para o SIGFI 45 (90 mil ton) como para o SIGFI 180 (111 mil ton). O chumbo metálico, os sais e os óxidos de chumbo respondem por 67% da massa de resíduos (60 a 73 mil ton).

**Tabela 7.** Proporção e massa dos constituintes das baterias de chumbo-ácido – toneladas.

FRAÇÕES PRINCIPAIS	%	RESÍDUO [t]	
		45 kWh	180 kWh
Chumbo Metálico	17	15.325	18.819
Sais e óxidos de chumbo	50	45.073	55.350
Plásticos	5	4.507	5.535
Ácidos	24	21.635	26.568
Resíduos	4	3.606	4.428
<b>TOTAL</b>		<b>90.145</b>	<b>110.700</b>

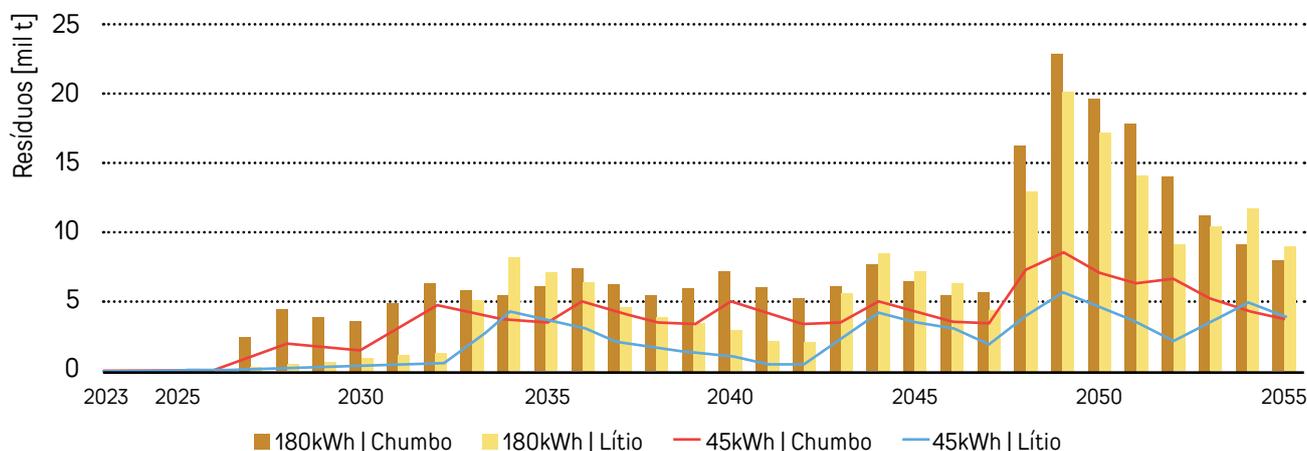
A maioria dos componentes das baterias de chumbo-ácido é reciclável. Seus constituintes são reaproveitados por diversas cadeias de produção, incluindo os metais para a produção de novas baterias e também para outras indústrias como a do plástico e até mesmo da agricultura (ILA, 2015).

Contudo, resta saber se a cadeia de descomissionamento, logística reversa e o mercado de reciclagem local atenderão a essa demanda. Caso contrário, será necessário desenvolver os mercados locais e estimular outras regiões para atender a essa demanda de serviço.

### EVOLUÇÃO TEMPORAL DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS NO ÂMBITO DO PROGRAMA MLA

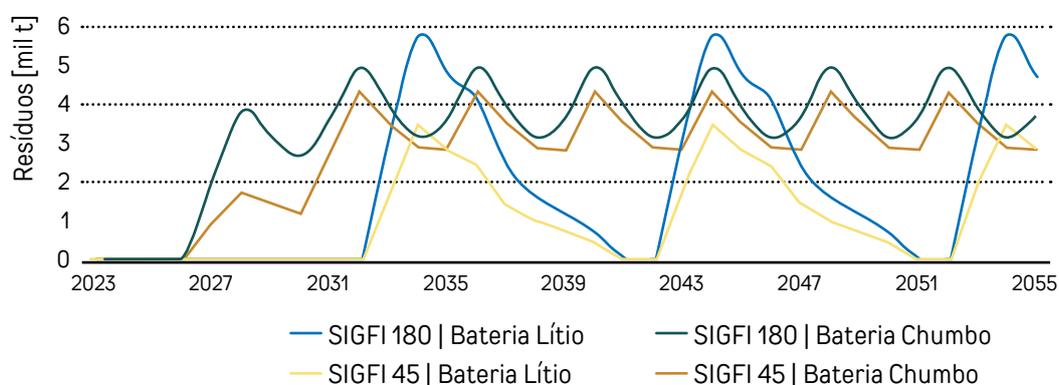
A Figura 17 apresenta a projeção anual de geração de resíduos ao longo de 32 anos. A diferença entre os sistemas SIGFI 45 kWh/mês e 180 kWh/mês ocorre pela maior quantidade de módulos fotovoltaicos do segundo sistema e pelas especificações de massa distintas para os seus componentes. Por sua vez, **a diferença entre os sistemas que utilizam baterias de chumbo-ácido e de íon-lítio deve-se à quantidade de unidades e ao tempo de vida útil distintos** entre as tecnologias de armazenamento de energia.

**Figura 17.** Geração total de resíduos ao longo do tempo – toneladas.



O crescimento da geração de resíduos seria significativo a partir de 2047, **quase triplicando a massa anual de resíduos em 2049**, devido ao fim de vida útil da maioria dos módulos FV. **Mais da metade dos resíduos ocorreria entre 2047 e 2055** para SIGFI 180. Antes desse período, os resíduos gerados seriam resultantes da danificação e degradação prematura dos módulos fotovoltaicos da substituição dos inversores solares e das baterias, variando de 42% a 47% da massa total, a depender do sistema de armazenamento. Para SIGFI 45, mais da metade dos resíduos ocorreriam a partir de 2046. A Figura 18 detalha a evolução temporal da geração de resíduos dos sistemas de armazenamento.

**Figura 18.** Cenários de geração de resíduos por tipo de padrão e tecnologia de armazenamento.



As linhas que representam os sistemas com baterias de chumbo-ácido indicam picos constantes de geração de resíduos resultantes da substituição das baterias, em intervalos de quatro anos. Os sistemas com baterias de íon-lítio apresentam três picos de geração a cada dez anos. A diferença de intervalo de substituição influencia diretamente a geração de resíduos e, somado à maior quantidade de unidades, explica o impacto maior da utilização da bateria de chumbo-ácido em relação à bateria de íon-lítio.

À medida que a capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos e armazenamento aumenta, também aumenta o número de sistemas danificados e desativados. Ao longo das próximas três décadas, esses sistemas atingirão o fim de sua vida útil e deverão ser desmobilizados, substituídos e destinados adequadamente. Assim, se faz importante entender os processos de logística reversa e a infraestrutura existente na região para este fim.

Nesse sentido, **um sistema de coleta, logística reversa e reciclagem de sistemas FV e baterias é essencial para uma transição energética sustentável**, especialmente em uma das regiões com maior biodiversidade do mundo e localização remota em relação aos centros urbanos com serviços de saneamento público.

### 3.2 – POTENCIAL DE RECICLAGEM DE COMPONENTES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

#### RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Segundo Rollet and Beetz (2020), **o potencial de recuperação desses módulos é superior a 94%**, uma vez que os módulos fotovoltaicos são constituídos majoritariamente por vidro e alumínio, facilitando o processo de reciclagem da maior parte da sua massa, conforme mostra a Tabela 8.

**Tabela 8.** Composição padrão (%) e potencial de recuperação (% e peso) de um módulo FV c-Si.

Material	Massa [%]	Recuperação [%]	Massa [kg]
Vidro	74	100	13,5
Al	10	100	1,83
Si	~3	90	0,56
Polímeros	~6,5	0	1,18
Sn	0,12	100	0,0219
Pb	<0,1	100	0,0183
Cu	0,6	100	0,11
Ag	<0,006	100	0,0065

No entanto, a reciclagem dos metais, como o chumbo (Pb), cobre (Cu), prata (Ag) e estanho (Sn) é complexa. A extração desses elementos das células fotovoltaicas requer métodos químicos, pois os métodos físicos são incapazes de extrair esses materiais de baixa concentração. Tais métodos têm normalmente custos mais altos do que os métodos físicos e geram resíduos químicos.

No caso de sistemas centralizados, há descarte correto dos equipamentos, previsto contratualmente entre os empreendedores e seus fornecedores. Já na geração distribuída, é comum ter o acompanhamento da performance da geração do sistema fotovoltaico por parte do integrador que, na eventualidade de uma manutenção ou substituição de equipamentos, deveria providenciar o descarte adequado por meio de uma empresa recicladora.

A principal empresa dedicada ao processo intermediário de reciclagem de módulos fotovoltaicos no país, a SunR, recebeu mais de 257 toneladas de módulos fotovoltaicos danificados em 2022 provenientes de oito estados, representando 2,86 MW (Canal Energia, 2021). Outras empresas, principalmente integradoras, realizam a coleta dos módulos danificados para, posteriormente, proceder a destinação final sem processos intermediários de reciclagem.

## RECICLAGEM DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO



OS A MAIOR MOTIVAÇÃO PARA A RECICLAGEM DAS BATERIAS É A OFERTA LIMITADA DO RECURSO PARA A PRODUÇÃO, POIS METAIS CONTIDOS NAS BATERIAS USADAS SÃO FONTES SECUNDÁRIAS E MAIS BARATAS DO QUE AS FONTES PRIMÁRIAS DOS METAIS.

Na Europa e nos Estados Unidos, cerca de 99% das baterias de chumbo-ácido são recicladas (ILA, 2015). A Moura garante a reciclagem de todas as suas baterias comercializadas (Moura, 2017). O Ministério do Meio Ambiente firmou acordos intersetoriais de implementação de sistema de logística reversa, para a reciclagem de 155 mil toneladas de baterias de chumbo até 2023 (Brasil, 2020a). Segundo o SNIR (2020a), foram recolhidas 275.427 toneladas (15.301.517 unidades) de baterias de chumbo-ácido em 2022, mas não há informações sobre a disposição final dessas unidades.

A reciclagem de baterias de chumbo-ácido pode servir para a produção de diversos materiais. O plástico é reaproveitado para produzir novas carcaças de baterias. O chumbo serve para fabricação de alguns constituintes das baterias e de óxidos de chumbo. E os eletrólitos podem ter dois destinos: fabricação de têxteis, vidros e detergentes e fabricação de novas baterias (ILA, 2015).

No entanto, **a maior motivação para a reciclagem das baterias é a oferta limitada do recurso para a produção**, pois metais contidos nas baterias usadas são fontes secundárias e mais baratas do que as fontes primárias dos metais. Somam-se a essas motivações as exigências legais previstas na Resolução CONAMA nº401/2008 (Conama, 2008) e na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010b), que tornam obrigatório o gerenciamento ambientalmente adequado de baterias de chumbo-ácido, requerendo o desenvolvimento de sistemas de logística reversa.

Para a reciclagem das baterias de chumbo-ácido é necessário, inicialmente, remover os constituintes plásticos que as envolvem e também o chumbo, por meio da trituração mecânica. Após isso, o plástico segue para a reciclagem e os outros constituintes passam por métodos pirometalúrgico e hidrometalúrgico, visando à recuperação dos metais de interesse.

O método pirometalúrgico é o mais utilizado devido à simplicidade do processo e ao menor custo de operação. Após o processo de pirólise, obtém-se o chumbo metálico, separado na fornalha, e uma escória constituída 95% de sulfeto de ferro e 5% de óxido de chumbo e outros metais, que é inutilizada. **O chumbo é transformado em lingotes para possibilitar seu reaproveitamento.** As taxas de recuperação do chumbo metálico correspondem a mais de 90% (Tian et al., 2017).

Em relação ao método hidrometalúrgico, o processo proporciona maiores taxas de recuperação. Todavia, o custo mais alto e o

uso de reagentes desestimulam sua utilização (Tian et al., 2017). É possível realizá-lo por meio dos processos de lixiviação por reagente seguida por eletrorrecuperação, lixiviação orgânica seguida por calcificação ou lixiviação alcalina seguida de cristalização.

**Todos esses métodos reciclam metais para serem reutilizados em baterias de chumbo-ácido, mas o método de lixiviação orgânica pode ser aplicado para recuperar componentes úteis para baterias de íon-lítio. A recuperação de chumbo por meio de ambos os métodos varia entre 95% e 100% para o método de eletrorrecuperação, entre 98% e 99% para a lixiviação alcalina e entre 97% e 98%, na lixiviação orgânica (Li et al., 2019). Estima-se um custo de 1,2 US\$/kg para a reciclagem pelo método hidrometalúrgico (Tian et al., 2017).**

A reciclagem das baterias, tanto pelo método pirometalúrgico como pelo hidrometalúrgico, pode recuperar quase a totalidade de mais de 15 toneladas de chumbo metálico provenientes das baterias de chumbo-ácido, previstas ao longo da vida útil dos sistemas fotovoltaicos do MLA.

No entanto, **garantir o efetivo gerenciamento dos resíduos desses sistemas de armazenamento em regiões remotas requer uma cadeia estruturada de descomissionamento**, que deverá arcar com os resíduos gerados a fim de reduzir o seu risco em relação à exposição ambiental e humana, além de garantir a reposição dos recursos de fonte secundária necessários à fabricação de baterias de chumbo.

### RECICLAGEM DE BATERIAS DE ÍON-LÍTIO

A China, com mais de 60% do mercado, e a Coreia do Sul são os países mais representativos quanto à reciclagem de baterias de íon-lítio (Dall-Orsoletta et al., 2022). Embora não exista um padrão universal de classificação e processo de reciclagem (Mrozik et al., 2021), estima-se que menos de 5% das baterias de íon-lítio produzidas no mundo são recicladas ao final da sua vida útil (Church & Wuennenberg, 2019). A maioria é descartada em aterros sanitários comuns (Dall-Orsoletta et al., 2022).

Diferentemente das baterias de chumbo-ácido, as baterias de íon-lítio apresentam muitos desafios para sua reciclagem. Os métodos de reciclagem iniciam com desmantelamento físico das baterias e a retirada de cargas residuais que podem ocasionar ex-

plosões. Após o pré-tratamento, direciona-se o material catódico para as etapas de separação físico-químicas. Os métodos principais são o pirometalúrgico e o hidrometalúrgico.

No método pirometalúrgico, os materiais catódicos são removidos por meio do aquecimento em fornos com alta temperatura (Duan et al., 2022), resultando em dois produtos: ligas constituídas de cobalto (Co), cobre (Cu), níquel (Ni) e ferro (Fe); e escória que contém lítio (Li), alumínio (Al), silício (Si), cálcio (Ca) e ferro (Fe), podendo ser recuperados com processos de lixiviação.

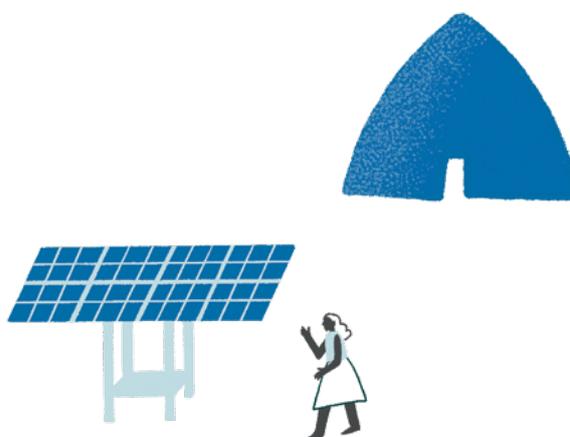
Por meio do processo de pirólise é possível recuperar diferentes proporções de cobalto (Co), lítio (Li), manganês (Mn) e níquel (Ni), **em proporções que variam de 82% a 100% de eficiência** (Duan et al., 2022), com custo em torno de 1,5 US\$/kg. Porém, o consumo intenso de energia, a perda de material na escória quando não lixiviada e a contaminação secundária pela emissão de poluentes nocivos ao meio ambiente desestimulam a aplicação desse método.

O processo hidrometalúrgico permite obter altas taxas de recuperação de materiais, em torno de 75% a 100%. Além disso, é um processo com baixo consumo de energia e baixa poluição secundária (Duan et al., 2022; Huang et al., 2018). O custo de reciclagem dos componentes da bateria pode variar de 0,9–3,0 US\$/kg (Thompson et al., 2021). Contudo, o consumo químico é intenso e a necessidade de lidar com este resíduo deve ser alvo de pesquisas e desenvolvimento.

Entende-se que um processo ideal de reciclagem deve ser capaz de recuperar os materiais das baterias, com baixo consumo de energia e poluição ambiental. O processo que mais se aproxima disso é o hidrometalúrgico, embora sua aplicação demande investimentos e utilização de grandes quantidades de reagentes.



**O PROCESSO  
HIDROMETALÚRGICO  
PERMITE OBTER ALTAS  
TAXAS DE RECUPERAÇÃO  
DE MATERIAIS, EM TORNO  
DE 75% A 100%. ALÉM  
DISSO, É UM PROCESSO  
COM BAIXO CONSUMO  
DE ENERGIA E BAIXA  
POLUIÇÃO SECUNDÁRIA.**



### 3.3 – O ESTÁGIO ATUAL DA LOGÍSTICA REVERSA NO BRASIL

A logística reversa é um **mecanismo institucional de desenvolvimento econômico e social amplamente utilizado para regulamentar a destinação de resíduos de forma sustentável**. É modelada a partir de um conjunto de ações e procedimentos, estabelecidos em legislação e em incentivos públicos específicos, para viabilizar economicamente (Soares, 2017) a coleta, a separação, e o envio de produtos usados, danificados ou obsoletos, dos pontos de consumo até os locais de reprocessamento, revenda e descarte (Ghizoni, 2016).

Em uma abordagem de política socioambiental para resíduos sólidos, a responsabilidade — física e/ou econômica, total ou parcial — do produto até o estágio pós-consumo do seu ciclo de vida é transferida integralmente aos fabricantes, cabendo aos agentes públicos a instrumentalização de incentivos e penalidades para que esse processo ocorra de forma sustentável ao longo dos anos.

Tal responsabilidade foi reforçada pela PNRS e pelo Decreto Nº 10.936/2022 (Brasil, 2022a), que a regulamenta, ao normatizar os pontos específicos e as minúcias necessárias para fiel execução da lei, sem contrariá-la ou alterá-la.

Por meio dos seus mecanismos, cria-se incentivos à não geração, redução, reutilização, reciclagem e ao tratamento dos resíduos sólidos, bem como à disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos<sup>16</sup>. Em caso de não cumprimento da lei, o gestor municipal pode aplicar penalidades administrativas, civis e penais.



16. A lei também instituiu o Programa Nacional de Logística Reversa integrado ao Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR) e ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares). São instrumentos de coordenação e de integração dos sistemas de logística reversa coordenados pelo MMA (MMA, 2022).

O artigo 33 da Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010b) dispõe sobre a obrigatoriedade de estruturar e implementar sistemas de logística reversa mediante retorno dos produtos — após o uso pelo consumidor **de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos** —, aos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de diversos produtos, como pilhas, baterias de equipamentos eletroeletrônicos, baterias automotivas (exclusivamente do tipo chumbo-ácido, também utilizadas em sistemas fotovoltaicos para armazenamento da energia) e eletrodomésticos de grande porte, nos quais os módulos FV e inversores solares se enquadram (MMA, 2022)<sup>17</sup>.

Porém o artigo não dispõe sobre as baterias de íon-lítio, seja para uso estacionário, seja para uso automotivo, pois ainda não há um tratamento regulatório para este tipo de tecnologia no país.

#### LOGÍSTICA REVERSA DE PILHAS E BATERIAS

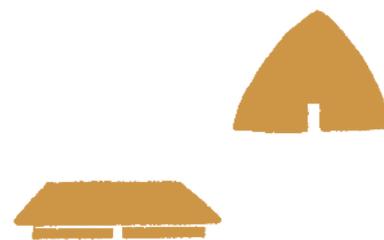
No Brasil, a logística reversa de pilhas, baterias de equipamentos eletroeletrônicos e de baterias automotivas é regulamentada pela Resolução 401/2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Trata-se de um ato administrativo normativo para disciplinar as competências e explicar a regulamentação, **definindo a obrigatoriedade dos estabelecimentos que comercializam os produtos a recebê-los dos consumidores** e encaminhá-los para a destinação ambientalmente adequada, de responsabilidade do fabricante ou importador (Conama, 2008). No entanto, **a resolução não inclui baterias de íon-lítio estacionárias**.

O Acordo Setorial para destinação final de baterias chumbo-ácido, firmado pelas empresas dessa cadeia junto ao MMA e tendo o Instituto Brasileiro de Energia Reciclável (IBER) como entidade gestora<sup>18</sup> (IBER, 2019), conta com 245 empresas associadas, sendo a maioria distribuidora ou importadora, e nove fabricantes (SINIR+, 2020a).

---

17. O PNRS tem instrumentos econômicos definidos por lei para a estruturação de sistemas de coleta seletiva e de logística reversa, desde que haja o estabelecimento de critérios, metas e outros dispositivos complementares de sustentabilidade ambiental para as aquisições e contratações públicas. As instituições financeiras federais poderão criar linhas especiais de financiamento para as atividades de reutilização, recuperação e aproveitamento energético dos resíduos.

18. Entidade criada exclusivamente para a implementação da PNRS no setor, oferecendo solução para a gestão da logística reversa de baterias e atuando na interlocução e apoio ao setor privado e órgãos competentes para o atendimento das obrigações ambientais (IBER, 2022).



## POLÍTICAS INTERNACIONAIS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS<sup>1</sup>

A União Europeia é a única região com regulação específica para a gestão de resíduos de módulos FV (IRENA, 2016). A *Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive*\* tem requerimentos em conformidade com padrões e especificações técnicas para a coleta, logística e tratamento de lixo eletrônico e equipamentos elétricos. O tripé dessa política é composto por atividades de gestão, galgadas no cumprimento de responsabilidades financeiras<sup>2</sup>, de reporte<sup>3</sup> às instituições fiscalizadoras e de comunicação com a sociedade<sup>4</sup> (European Commission, 2019).

Outros mercados fotovoltaicos desenvolvidos, como o Japão e a Coreia do Sul, ou em rápida expansão, como a Índia e a China, não têm regulação específica para resíduos de módulos FV. No entanto, tais mercados se preparam para os futuros fluxos de resíduos com projetos de P&D para desenvolver tecnologias e processos de reciclagem de baixo custo e pelo estabelecimento de políticas públicas com metas de longo prazo (Ghizoni, 2016; Komoto & Lee, 2018).

\* Diretiva sobre Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE).

1. Fonte de dados e informações: (Ghizoni, 2016; MINFRA, 2022), (IRENA, 2016; Komoto & Lee, 2018), (China Dialogue, 2022) (European Commission, 2019), (IEA, 2021), (IEA, 2022b).

2. Custear a coleta e a reciclagem com pontos de coleta e reciclagem primária distribuídos geograficamente.

3. Reporte sobre o volume de produtos vendidos, retirados, retornados à cadeia de reciclagem e às destinações e tratamentos aplicados.

4. Como exemplo de comunicação, cita-se a rotulagem dos produtos indicando que o descarte deve ser feito em instalações de coletas dedicadas.



#### **EUA**

O descarte dos módulos FV é regido pela Resource Conservation and Recovery Act, 1976, o marco legal para a gestão de resíduos sólidos perigosos e não-perigosos. Em nível estadual, há estados que promovem regulação e leis específicas, como a Califórnia, o mercado FV mais avançado do país. Já o estado de Washington exige que fabricantes de sistemas solares sejam responsáveis por um programa de reciclagem para que possam comercializá-los no estado.



#### **UNIÃO EUROPEIA**

A União Europeia é a única região com regulação específica para a gestão de resíduos de módulos FV. A WEEE Directive, possui requerimentos de coleta, logística e tratamento de lixo eletrônico e equipamentos elétricos.

#### **ALEMANHA**

A Alemanha, com mercado maduro de FV, possui regulamentos com disposições específicas para coleta, recuperação e reciclagem de módulos FV.

#### **REINO UNIDO**

O Reino Unido tem regulamentos específicos para resíduos FV. A legislação determinou uma nova categoria dedicada ao financiamento da coleta e reciclagem de módulos FV, a fim de separá-los da categoria de equipamentos eletrônicos. Todavia, a legislação específica prevê o tratamento inicial dos PV – registro e coleta – com tratamentos posteriores no exterior.



#### **CHINA**

A china é líder global do mercado de FV, mas não possui regulamentos específicos para o tratamento de resíduos de módulos FV. O país com a cadeia solar mais desenvolvida não possui indústria madura de reciclagem de módulos FV.

#### **JAPÃO**

O mercado do Japão é maduro. Mesmo assim, não possui regulação específica para os resíduos de módulos FV, sendo tratados na estrutura regulatória geral de gerenciamento de resíduos.

#### **COREIA DO SUL**

O mercado da Coreia do Sul é maduro e também não institui regulamentos específicos para a gestão do fim de vida útil dos módulos FVs.

#### **ÍNDIA**

A Índia, com mercado de FV em crescimento exponencial, não possui regulamentos específicos para a coleta, recuperação e reciclagem de módulos FV.

O acordo é um mecanismo que estabelece e promove o cumprimento de metas progressivas e diferentes para cada região do país, observando o tamanho da cadeia produtiva e a realidade de atendimento da PNRS em nível regional. As Regiões Sul, Sudeste, Nordeste, Centro-Oeste e Norte deverão cumprir metas de coleta adequadas à legislação, que variam de 65% a 85% do total comercializado na região (Conama, 2008).

**O descarte ou a incineração de baterias de chumbo-ácido são proibidos em qualquer tipo de aterro sanitário.** A responsabilidade da fiscalização é do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (Ibama). Fabricantes nacionais e importadores<sup>19</sup> de pilhas e baterias devem apresentar, anualmente, um laudo físico-químico de composição e um plano de gerenciamento que contemple a destinação ambientalmente adequada.

Essa destinação deve adotar procedimentos técnicos de coleta, recebimento, reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final de acordo com a legislação ambiental vigente de modo a minimizar os riscos ao meio ambiente (Conama, 2008).

**É proibida a importação de resíduos sólidos perigosos e rejeitos que causem danos ao meio ambiente, à saúde pública e animal e à sanidade vegetal, ainda que para tratamento, reforma, reuso, reutilização ou recuperação dos resíduos sólidos em algum processo produtivo ou uso final no país. Nesse caso, o importador está sujeito a multas que variam entre R\$ 500 a R\$ 10 milhões (MMA, 2022).**

Assim, a utilização de baterias automotivas de segunda vida para o armazenamento estacionário dos sistemas *off-grid* ou de geração distribuída (GD) dependeria de permissão de importação, bem como de estudos e regulamentação específica.

A logística reversa de baterias automotivas de chumbo-ácido no Brasil **assegura à sua cadeia de produção taxas anuais entre 80% e 99% de reciclagem, dependendo da região.** Esta é uma das maiores performances de reciclagem entre todos os produtos fabricados e comercializados no país por conta da regulamentação que obriga comercializadores a recebê-las dos consumidores ao final da sua vida útil (Figura 19).

---

19. Pessoa jurídica que importa para o mercado interno pilhas, baterias ou acumuladores ou produtos que os contenham, fabricados fora do país (Conama, 2008).

**Figura 19.** Porcentagem de produtos reciclados em relação à sua produção no Brasil.

**Fonte:** (Moura, 2022b), (SINIR+, 2020a), (Brasil, 2022c), (CEMPRE, 2022), (Recicla Sampa, 2022).

1. Taxa anual de reciclagem da maior fabricante nacional de baterias de chumbo-ácido.

2. Meta nacional de reciclagem anual de baterias de chumbo-ácido.



A maior fabricante desse tipo de produto no Brasil apresenta índices de reciclagem de até 103% ao ano, isto é, inclusive recicla a produção de outros fabricantes e importadores.

De acordo com a Constituição Federal, os municípios são responsáveis diretos por legislar e executar os serviços de limpeza pública, coleta, transporte e disposição final dos resíduos sólidos urbanos (Meza et al., 2013).

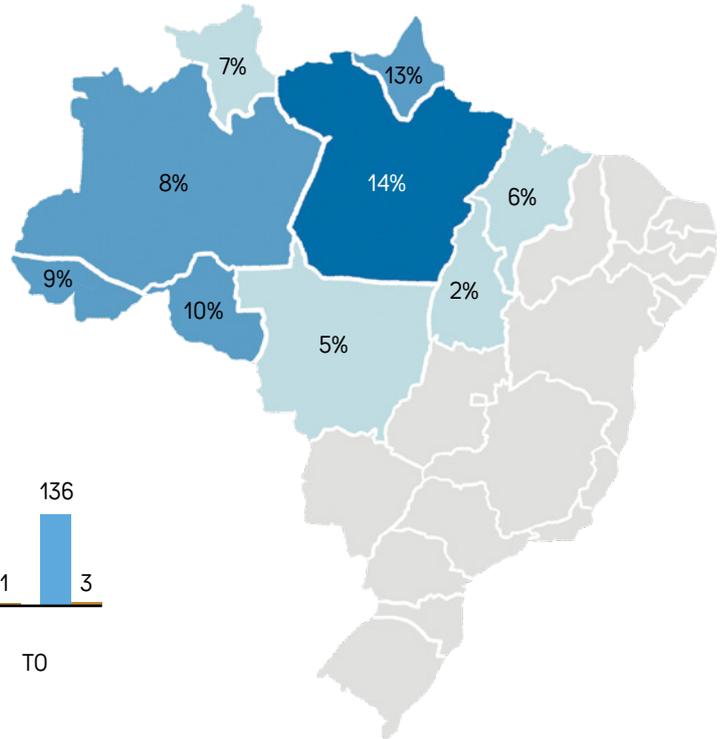
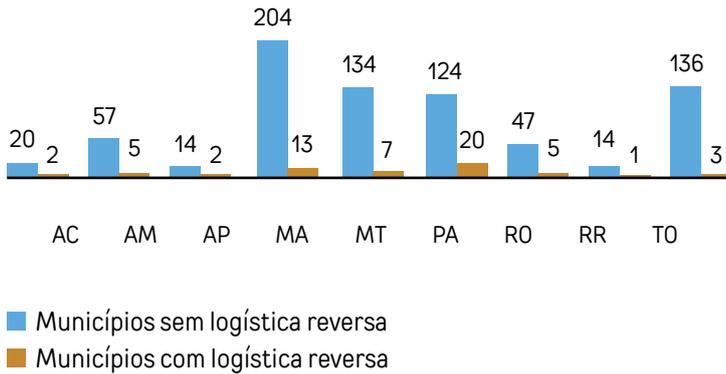
Em 2019, estavam em operação 49.919 pontos de entrega voluntária (PEV), distribuídos em 4.456 municípios (97,5% do total), recolhendo 275 mil toneladas de baterias automotivas de chumbo-ácido e recuperando e retornando ao mercado 146 mil toneladas de chumbo. Há a expectativa de serem recolhidas e enviadas para reciclagem mais de 27 milhões desse tipo de baterias ao ano (MMA, 2022).

Dos 5.570 municípios brasileiros, 400 (7% do total) possuem logística reversa, e, dos 808 municípios da Amazônia Legal, apenas 58 contam com esse tipo de serviço. No caso do Tocantins, são apenas dois municípios de um total de 14. Já Roraima tem apenas um município entre 14 com esse tipo de serviço (Figura 20), demonstrando que **o Brasil não tem estrutura e ferramental para cumprir suas leis e reduzir o impacto negativo dos sistemas produtivos ao meio ambiente e à saúde da população.**

### 3. AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS

**Figura 20.** Quantidade e porcentagem de municípios da Amazônia Legal com logística reversa.

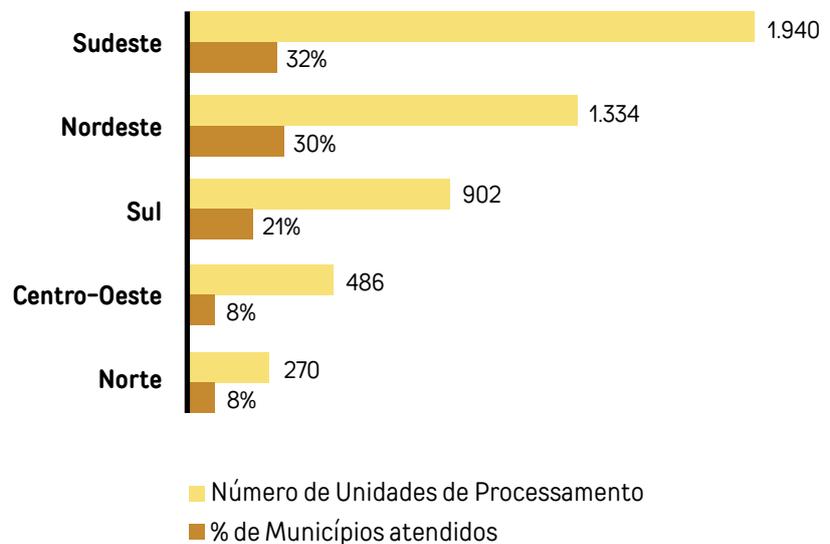
Fonte: SNIS (2021) e IBGE (2022).



A baixa penetração de serviços de logística reversa na Amazônia relaciona-se ao baixo número de unidades de processamento de resíduos sólidos na região. **A taxa de atendimento é de apenas 8% dos municípios**, enquanto regiões com maior abrangência de serviço de logística reversa possuem unidades de processamento em 30% ou mais dos municípios (Figura 21).

**Figura 21.** Municípios com unidades de processamento de resíduos sólidos, base 2018.

Fonte: SNIS (2021).



## LOGÍSTICA REVERSA DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS

A logística reversa de eletrônicos, **que inclui módulos fotovoltaicos e inversores**, foi regulamentada em 2020 pelo Decreto Nº 10.240/20 (Brasil, 2020b). As competências fiscalizatórias são do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA)<sup>20</sup>.

O MMA e o CONAMA podem editar atos normativos, objetivando condicionar a emissão ou a renovação de licenças de operação dos recicladores à transparência da divulgação da estruturação e implementação de sistemas de Logística Reversa de eletroeletrônicos de uso residencial.

Se provocado política e institucionalmente, **o MMA pode revisar metas, cronogramas e os prazos estabelecidos no Decreto Nº 10.240/20**, além de apoiar outros órgãos ambientais na elaboração de medidas para simplificar a instalação de pontos de recebimento e consolidação de equipamentos descartados.

**O financiamento do sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos é feito pelas empresas fabricantes ou importadoras**, que realizam pagamentos diretamente às entidades gestoras ou sistemas individuais<sup>21</sup>, na proporção correspondente à sua participação no mercado de uso doméstico.

**Além disso, as empresas e entidades gestoras são obrigadas a estruturar, implementar e operacionalizar o sistema de logística reversa; criar grupos de acompanhamento de performance dessa implementação e operacionalização; e contratar estudos relacionados à implementação e à operação desse sistema (Brasil, 2020b).**

Estruturação e implementação compreendem duas fases, observando os seguintes prazos: (i) até 31 de dezembro de 2020 para a criação dos grupos de acompanhamento de performance para garantir a adesão de fabricantes, importadores distribuidores e comerciantes, entre outras; e (ii) com início em 1º de janeiro de 2021 e término de implementação até 2025 (variando entre as

---

20. Conjunto de órgãos públicos (União, estados, municípios e institutos não-governamentais instituídos pelo poder público) responsáveis pela proteção ambiental no Brasil.

21. “Pessoa jurídica constituída pelas empresas fabricantes e importadoras ou associações de fabricantes e importadores de produtos eletroeletrônicos, que atenda aos requisitos técnicos de gestão com o objetivo de estruturar, implementar e operacionalizar o sistema de logística reversa” (Brasil, 2020b).



AS OBRIGAÇÕES DOS FABRICANTES E DOS IMPORTADORES CONSISTEM EM DAR DESTINAÇÃO FINAL AMBIENTALMENTE ADEQUADA, PREFERENCIALMENTE PARA A RECICLAGEM, A 100% DOS PRODUTOS ELETROELETRÔNICOS COLETADOS.

OS DISTRIBUIDORES — EMPRESAS RESPONSÁVEIS PELA CADEIA LOGÍSTICA DE PRODUTOS NACIONAIS OU IMPORTADOS — DEVEM INCENTIVAR A ADESÃO DOS ESTABELECIMENTOS INTEGRANTES DA CADEIA COMERCIAL AO SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA VIA ENTIDADES GESTORAS OU PARTICIPAÇÃO INDIVIDUAL.

UF), habilitar os prestadores de serviços que atuarão na logística reversa; elaborar planos de comunicação e educação ambiental, com o objetivo de divulgar, qualificar lideranças, associações e gestores municipais quanto à implementação do sistema; e instalação de pontos de recebimento de produtos.

As obrigações dos fabricantes e dos importadores consistem em dar destinação final ambientalmente adequada, preferencialmente para a reciclagem, a 100% dos produtos eletroeletrônicos coletados.

Os distribuidores — empresas responsáveis pela cadeia logística de produtos nacionais ou importados — devem incentivar a adesão dos estabelecimentos integrantes da cadeia comercial ao sistema de logística reversa via entidades gestoras ou participação individual.

Já os comerciantes devem informar aos consumidores as responsabilidades de receber, acondicionar e armazenar temporariamente os produtos eletroeletrônicos descartados nos pontos de recebimento e efetuar a devolução desses produtos aos fabricantes e importadores.

No entanto, **o Decreto Nº 10.240/20 não favorece a logística reversa em locais isolados e remotos**, uma vez que os critérios e parâmetros estabelecidos para a definição dos pontos de recebimento de resíduos<sup>22</sup> privilegiam o atendimento de locais com maior concentração demográfica, principalmente **regiões urbanas com infraestrutura de serviços** e atividades econômicas mais desenvolvidas.

22. Entre os parâmetros, citam-se a quantidade de domicílios com energia elétrica, a estimativa da quantidade de produtos eletroeletrônicos comercializados e descartados no mercado interno, a distância de deslocamento dos consumidores aos pontos de recebimento e a demonstração da capacidade de financiamento do sistema de logística reversa.

## ESTRUTURA DE MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA AMAZÔNIA LEGAL

O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), administrado pela Secretaria Nacional de Saneamento do Ministério do Desenvolvimento Regional (SNS/MDR), consolida e estrutura dados de manejo de resíduos sólidos urbanos desde 2002 (SNIS, 2022b, 2022a).

Essa estrutura tem dificuldades de levantamento de dados e manutenção da série histórica do SNIS, pois os dados originais são fornecidos diretamente pelos municípios, a partir do preenchimento e envio de formulários de coleta<sup>1</sup>.

A última consolidação de dados, em 2020, apresenta informações de 4.589 municípios (82,4% do total), distribuídos nas 27 unidades da federação (SNIS, 2021).

Do total de municípios, 1.846 indicam possuir serviços de limpeza pública e manejo de resíduos sólidos urbanos, enquanto 2.268 declararam possuir Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIS).

A Região Norte do país, principal foco deste trabalho, apresenta dados de 334 municípios (74,2% do total), alcançando 16 milhões de habitantes (86% do total). No entanto, a mesma base de dados demonstra que o serviço de coleta de resíduos domiciliares atende a 81% da população da região<sup>2</sup> (SNIS, 2021).

O manejo de resíduos sólidos<sup>3</sup> é um dos componentes do serviço público de saneamento básico (Lei N° 11.445/2007, atualizado pela Lei N° 14.026/2020), consistindo nas atividades de disponibilização, em que parte dos resíduos podem ser recuperados, reciclados ou reutilizados, desde que a coleta e manejo sejam feitos de forma concatenada com os ciclos produtivos (Brasil, 2007, 2020c).

1. Problemas identificados: (i) dificuldade de obtenção de informações pelos prestadores de serviços; (ii) falta de quadros técnicos municipais com formação e treinamento contínuo para realização das tarefas em decorrência das mudanças de gestão; e (iii) amplitude de terminologias utilizadas nas diferentes regiões.

2. A base de dados é um instrumento de promoção e transparência das ações municipais e de assessoramento aos tomadores de decisões e interessados no processo por facilitar o direcionamento de políticas públicas (Silva, 2022).

3. Resíduo sólido é todo material descartado resultante de atividade humana em sociedade (Brasil, 2010c).



Dentro do manejo, há a modalidade de coleta seletiva de materiais recicláveis, que consiste no recolhimento diferenciado de resíduos sólidos secos. O material reciclável é separado na fonte geradora e coletado em pontos coletivos, ou porta a porta, para ser enviado às unidades intermediárias de processamento.

Posteriormente, os diferentes materiais são encaminhados para unidades de tratamento, passando por processos de triagem e compostagem para posterior reutilização ou reciclagem. Por fim, os materiais considerados economicamente não recuperáveis são dispostos em lixões e aterros<sup>4</sup>.

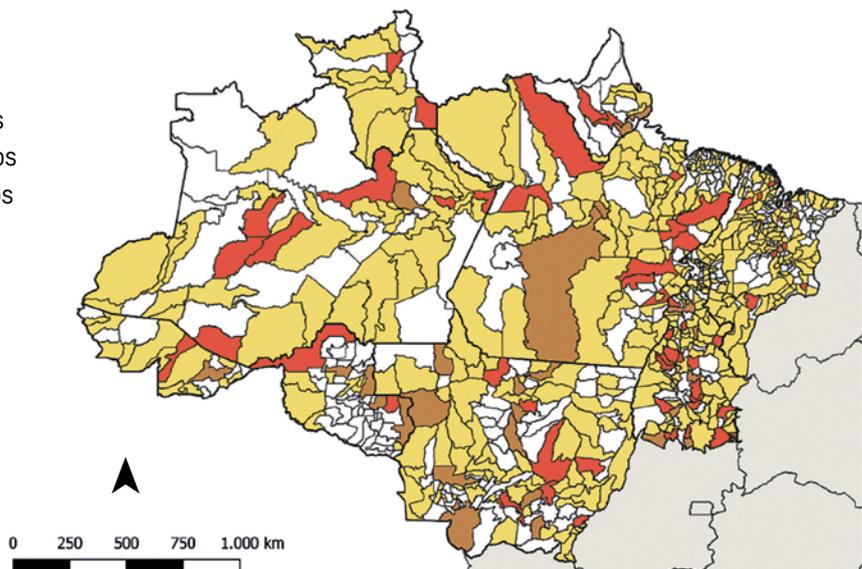
Na Região Norte, a quantidade de municípios atendidos por coleta seletiva é irrisória. Apenas 40 municípios (12% do total) têm coleta seletiva em qualquer modalidade e 26 municípios (8% do total) com coleta seletiva de porta a porta, atendendo a um milhão de habitantes (8% do total), demonstrando que há uma carência desse tipo de serviço público na região (SNIS, 2021).

Sobre a destinação final dos resíduos, 30 municípios contam com aterro sanitário e 71 com aterro controlado. A maioria, 444 municípios, dispõe os seus resíduos em lixões, e outros 319 não apresentam informação sobre a disposição final dos seus resíduos (Figura 22).

**Figura 22.** Destinação de resíduos sólidos por município da Amazônia Legal em 2021.

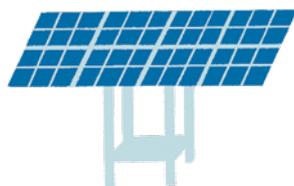
Fonte: SNIS (2021) e IBGE (2022).

- Aterro controlado ▶ 71 municípios
- Aterro sanitário ▶ 30 municípios
- Lixão ▶ 444 municípios
- Sem informação ▶ 319 municípios



**4. Lixão:** instalação sem qualquer tipo de controle (segurança e ambiental) e que recebe materiais de todas as origens e periculosidades. **Aterro sanitário:** instalação com controle operacional e técnico permanente para evitar a dispersão de resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) que causem danos à saúde pública e ao meio ambiente. **Aterro controlado:** instalação com baixo controle operacional e técnico, como estágio intermediário entre o lixão e o aterro sanitário, apresentando basicamente cuidados relacionados à segurança dos trabalhadores e trânsito de pessoas na unidade.

## 4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES



O programa Mais Luz para a Amazônia (MLA) impõe o acesso à energia elétrica da região da Amazônia Legal **unicamente por fontes renováveis de geração de eletricidade**. Essa obrigatoriedade é uma decisão coerente, já que se busca realizar o acesso à energia elétrica de forma sustentável na região, sobretudo por atender às unidades consumidoras excluídas do serviço público de acesso. Assim, a implementação da tecnologia solar fotovoltaica como possível alternativa é bastante adequada.

O atendimento de mais de 219 mil unidades consumidoras previstas no programa MLA utilizando SIGFI deve alterar o patamar da geração elétrica fotovoltaica da Região Norte do país, elevando-a à posição de destaque no ranking de capacidade e número de sistemas instalados nacionalmente. A depender do patamar de consumo a ser atendido, o justo acesso universal à eletricidade para comunidades remotas da Amazônia pode resultar na aquisição de até seis milhões de módulos fotovoltaicos e mais de cinco milhões de baterias estacionárias ao longo da vida útil dos sistemas.

Tendo em vista o número de equipamentos e componentes necessários para a implantação dos sistemas, o montante de recursos a serem aportados ao longo do programa e a participação institucional das distribuidoras e demais agentes do setor elétrico, seria natural haver atratividade das empresas participantes da cadeia solar e de armazenamento.

No entanto, ainda restam lacunas a serem preenchidas para o adequado enfrentamento de dois importantes desafios: (1) o planejamento e a execução da instalação de milhares de sistemas *off-grid* em áreas remotas, distribuídas num vasto território com pouca infraestrutura logística de transporte e comunicação; e (2) o planejamento e a execução da retirada e reciclagem dos resíduos a serem gerados (módulos FV, baterias e componentes), em escala e de forma distribuída.

A universalização do acesso à energia elétrica em regiões remotas da Amazônia Legal é uma questão de desenvolvimento regional e exige um programa robusto. Essa discussão deve envolver

diferentes atores vinculados a políticas públicas diversas, agentes do Estado, da cadeia solar fotovoltaica e de armazenamento, e organizações da sociedade civil. Com a finalidade de implementar um ciclo completo de atendimento, esses atores terão de lidar com a complexidade das demandas do programa MLA e de um sistema estruturado de descomissionamento e destinação final dos componentes de geração e armazenamento de energia.

Assim, são apresentadas propostas que reúnem **sugestões de aprimoramento da cadeia solar fotovoltaica e de armazenamento** para o suprimento de sistemas *off grid* na Amazônia Legal, além de recomendações quanto à **implementação de sistemas de logística reversa e reciclagem** para os sistemas fotovoltaicos e baterias, utilizados na implantação do programa Mais Luz para a Amazônia.

Essas sugestões abordam os temas de: (i) desenvolvimento do monitoramento e sistematização de dados e informações socioeconômicas das populações atendidas e dos sistemas implantados no programa; (ii) ampliação e transparência da contratação de equipamentos e serviços de implantação dos sistemas de geração e armazenamento; (iii) redefinição dos padrões de atendimento do programa pensados nos usos finais, padrão de consumo e na demanda reprimida de energia das unidades consumidoras; (iv) desenvolvimento de mecanismos de gestão de resíduos e logística reversa pensados para a região; e (v) estabelecimento de pesquisas e desenvolvimento de processos, estrutura regulatória e institucional para atuar e ampliar o acesso à energia elétrica e estabelecer uma efetiva política de resíduos e logística reversa para a região.



### 4.1 – APRIMORAMENTO DA CADEIA SOLAR FOTOVOLTAICA E DE ARMAZENAMENTO PARA O SUPRIMENTO DE SISTEMAS OFF-GRID NA AMAZÔNIA LEGAL

Embora o Brasil tenha apresentado crescimento exponencial da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos centralizados e distribuídos ao longo dos últimos anos, sua cadeia de produção de equipamentos, além de insuficiente para atender o mercado nacional e, portanto, depender fortemente de importações<sup>23</sup>, está concentrada nas Regiões Sul e Sudeste, em locais com infraestrutura de transporte e acesso aos pontos de importação (portos) e aos fabricantes de equipamentos, componentes e estruturas de instalação nacionais. É reduzido o número de empresas integradoras instaladas na Região Norte do país, e não há unidades de fabricação, salvo uma unidade de montagem de baterias na Zona Franca de Manaus. Esse desequilíbrio regional também está refletido na formação e na disponibilidade de trabalhadores especializados na cadeia solar fotovoltaica.

A atual conjuntura da cadeia solar fotovoltaica demonstra que o seu foco é o desenvolvimento e a implantação dos grandes sistemas centralizados e da GDFV conectada à rede elétrica, e não os sistemas *off-grid* em regiões remotas.

O foco em GDFV conectada à rede elétrica também é compartilhado pelos agentes reguladores e fiscalizadores, tendo em conta o déficit de informações disponíveis sobre os sistemas *off-grid* instalados e operantes no país. Não é o caso dos sistemas conectados à rede elétrica, que apresentam amplas fontes de informações, seja de organismos de estados, seja de entidades de classe. Tal deficiência de informações resulta em desafios. Entre eles, o mapeamento exato das comunidades e unidades consumidoras que necessitam do acesso e a exigência de trabalhadores qualificados em quantidade suficiente para implantação de milhares de sistemas de pico e micro capacidade para atender milhares de unidades consumidoras.

Portanto, a estruturação e a disponibilização de dados e informações representam um gargalo significativo para o acompanhamento, fiscalização e proposição de sugestões, avaliações e melhorias dos programas de acesso à energia elétrica, como no caso do Programa Mais Luz para a Amazônia (MLA). Medir e mo-

---

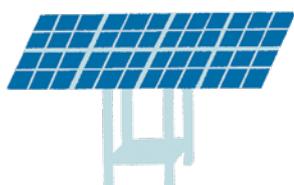
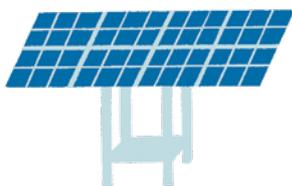
23. A inserção nacional da cadeia solar fotovoltaica ocorre predominantemente a partir da prestação de serviços de importação e distribuição de equipamentos; venda de kits solares, utilizando principalmente tecnologia importada e financiada com crédito público e subsidiado e por serviços de instalação; e O&M de sistemas principalmente por empresas integradoras.

nitorar essas informações é primordial para elaborar um planejamento que inclua o estabelecimento de mecanismos de gestão, metas e alocações de recursos, para garantir a sustentabilidade de longo prazo dos projetos de eletrificação.

Essa deficiência ocorre no programa MLA, que não conta com informações acessíveis<sup>24</sup> sobre os locais sem acesso à energia elétrica ou sobre os sistemas implantados, apesar da obrigatoriedade dessa disponibilização. Cita-se a ausência de uma base de dados tabulados ou georreferenciados para o monitoramento das conexões e características dos sistemas implantados no programa.

Como sugestão de encaminhamentos para o aprimoramento do acesso e conteúdo desses dados, sugere-se:

- **Construção e disponibilização PÚBLICA de base de dados** consolidada e informações georreferenciadas das características socioeconômicas das comunidades remotas da Amazônia Legal, preferencialmente vinculada ao CadÚnico, para integração das informações do programa de acesso à energia elétrica com outros programas de assistência social e redistribuição de renda. É primordial que o IBGE expanda o ferramental de mapeamento e disponibilização de informações sobre as pessoas das regiões remotas, inclusive locais, pois os dados sobre as comunidades remotas e isoladas da região da Amazônia acabam sendo integrados aos dados em nível municipal, dificultando uma avaliação e foco de políticas públicas para esse público específico.
- **Aumento da transparência pública** das informações de atendimento dos programas de universalização por meio da demonstração periódica, atualizada e georreferenciada na plataforma da Aneel. Deve-se incluir os repasses econômicos por distribuidora, via CCEE, e a evolução das unidades instaladas e suas respectivas características técnicas, com



24. Na tentativa de verificar a evolução do atendimento do programa, a Rede Energia & Comunidades solicitou ao MME, por meio do Requerimento de Informação nº 405/2022, o acesso aos dados e informações de conexões e metas de atendimento do programa em julho de 2022. Porém, as informações e dados requisitados não foram disponibilizados, sinalizando a falta de estrutura sistematizada de informação por parte das entidades responsáveis pelo Programa MLA. Além disso, o estudo Universalização do acesso à eletricidade no Brasil: avaliação dos SIGFIs e MIGDIs, produzido pelo IEI (2022), constatou que a lista dos sistemas SIGFI e MIGDI, implementados pelas distribuidoras, estão incompletas no portal da Aneel, indicando que as distribuidoras não seguem as exigências estabelecidas no programa MLA e no seu manual de operacionalização.

acompanhamento das metas anuais, incluindo a segmentação por distribuidora. Somente assim será possível acompanhar a evolução do programa e medir a eficiência de alocação de recursos concomitantemente às sugestões de melhorias com embasamento técnico e fundamentado em dados.

- **Replicar, para a cadeia solar *off-grid*, a base de dados já existente da cadeia solar fotovoltaica de sistemas conectados à rede elétrica** contemplando dados regionalizados de: custo de equipamentos e serviços; características técnicas das instalações; tipo e estrutura das empresas participantes dessa cadeia (número de empresas, número de funcionários, tipo de qualificação exigidos); origem e destinos dos equipamentos; formação de um banco de preços de equipamentos e de serviços contemplando as especificidades locais. A partir disso, é possível iniciar um processo de abertura do mercado *off-grid* e da Região Norte e repensar o mecanismo de compra e manutenção de equipamentos localmente.

Por isso, a definição de padrões de projetos adaptados ao local de implantação se torna importante no objetivo de diminuir o risco e as barreiras técnicas e econômicas do modelo de negócio. Assim, é essencial a transparência das informações sobre os sistemas implantados; o padrão e a periodicidade das manutenções com descrição das principais falhas e interrupções; o processo e os custos de descomissionamento; e o destino final, bem como os processos utilizados, dos resíduos dos sistemas *off-grid* ao longo do seu ciclo de vida.

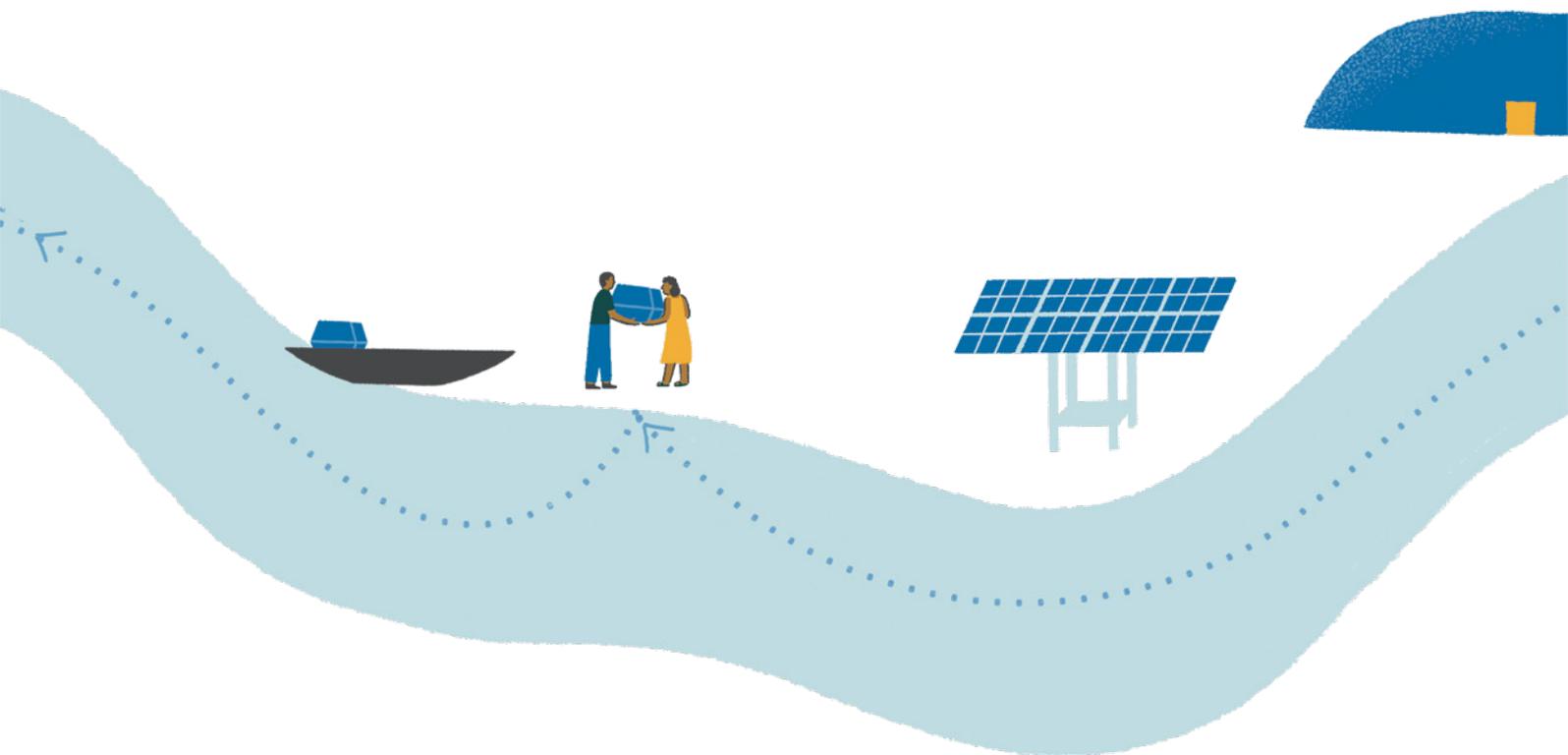
Portanto, o endereçamento dessas questões, atrelado à possibilidade de divulgação e ampliação de licitações para compra de equipamentos e sobressalentes, contratação de serviços de implantação dos sistemas, além do desenvolvimento e da capacitação de trabalhadores, são soluções que dependem de regulação, mas também do aprimoramento de políticas públicas. Estas, por sua vez, devem ampliar as opções de contratação dos serviços de implantação dos sistemas de geração e a transparência quanto ao número, local e características técnicas dos sistemas implantados e dispêndios realizados.

Dessa forma, a entrada de novos participantes deveria ser estimulada, aumentando a competitividade e eficiência da implantação dos sistemas ou, pelo menos, garantindo a antecipação da meta de conclusão do programa — prevista para 2030. As suges-

tões de encaminhamentos para o atendimento da cadeia solar fotovoltaica e de armazenamento à demanda por sistemas *off-grid* na região da Amazônia Legal se concentram em:

- **Criar centros regionais para a distribuição de sistemas e componentes**, além de fornecer capacitação de trabalhadores nas regiões de execução do programa e de implantação dos sistemas, ou seja, **descentralizar a mão de obra de atendimento e operacionalização do programa**.
- **Exigir e tornar público**, assim como os leilões de contratação de energia elétrica realizados pela CCEE, **o processo de licitação, cotação e contratação de serviços e equipamentos para atendimento do programa MLA** por parte das distribuidoras de energia. Além de transparente, esse processo permite a participação dos diversos agentes da cadeia, aumentando a concorrência e reduzindo o custo dos sistemas.
- Priorizar a utilização de equipamentos produzidos por unidades de fabricação nacional, podendo auxiliar o desenvolvimento da produção de equipamentos da cadeia solar de armazenamento em território nacional. Porém, essa política de desenvolvimento deve ser analisada em conjunto com outros atores do Estado. O objetivo é garantir que os sistemas adquiridos ou contratados pelo programa não tenham custos excessivos ou vida útil inferior em relação aos equipamentos ofertados no mercado de origem importada e que a meta do prazo de universalização do programa não seja comprometida.
- Padronizar a contratação dos serviços de manutenção preventiva dos sistemas de geração e de armazenamento remoto, empregando pessoas da comunidade local (que devem ser treinadas para realizarem os serviços a partir da implementação de programas de capacitação de trabalhadores), com metas de *benchmarking* de atendimento e renovação anual para empresas executoras desse tipo de serviço. As distribuidoras teriam o papel de fazer a gestão e informar ao agente fiscalizador os índices de desempenho dos sistemas e a qualidade do fornecimento de energia por bloco de área de concessão. Essa política visa garantir a prestação de um serviço de universalização, admitindo trabalhadores das comunidades locais e a sua qualidade ao longo do tempo.

- Atentar-se à implementação de geração de energia em comunidades remotas acima do consumo econômico (capacidade de o usuário possuir equipamentos eletroeletrônicos para consumir a eletricidade) e capacidade de adimplência, pois as famílias que recebem o acesso à energia elétrica podem consumir menos energia do que o mínimo mensal e são obrigadas a pagar o valor mínimo da geração mensal<sup>25</sup>. Atualmente, não há a opção de escoar o excedente de energia gerada e armazenada. Esse excedente de energia poderia ser consumido em atividades produtivas ou pela inserção de novas cargas comuns às comunidades locais, fornecendo energia para o uso coletivo. Porém, devido à falta de dados socioeconômicos e de pesquisas de hábitos de consumo, há incertezas em relação à carga produtiva e à demanda reprimida das famílias.



25. O padrão SIGFI 45 paga pelo consumo de 45 kWh/mês e o SIGFI 180, pelo consumo de 180 kWh/mês.

### **4.2 – IMPLANTAÇÃO EFETIVA DE LOGÍSTICA REVERSA E DE RECICLAGEM PARA OS COMPONENTES DOS SISTEMAS OFF-GRID A SEREM INSTALADOS NA AMAZÔNIA LEGAL**

Os cenários de geração de resíduos dos sistemas de geração de energia elétrica para atendimento do programa MLA mostram que poderiam ser gerados até 119 mil toneladas de resíduos de módulos fotovoltaicos e 110 mil toneladas de resíduos de baterias do tipo chumbo-ácido ao longo da vida útil dos sistemas, em uma região pouco estruturada para lidar com esse passivo.

A PNRS compartilha responsabilidade dos resíduos gerados entre o produtor e o consumidor e atribui ao fabricante e ao importador a responsabilidade de estruturar sistemas de logística reversa para baterias de chumbo-ácido e de eletrodomésticos de grande porte, que incluem os demais componentes fotovoltaicos. A política não define especificações para baterias de íon-lítio.

No entanto, convém destacar que o Decreto N° 10.240/20 — que regulamenta a logística reversa — não a favorece em locais isolados e remotos, uma vez que os critérios e os parâmetros estabelecidos para a definição dos pontos de recebimento de resíduos propiciam o atendimento em regiões urbanas com maior densidade demográfica, infraestrutura de serviços e atividades econômicas mais desenvolvidas<sup>26</sup>.

Assim, o sistema de logística reversa, reciclagem e disposição final de resíduos eletroeletrônicos na Amazônia Legal pode não ser capaz de lidar com os resíduos gerados no âmbito do programa MLA, uma vez que apenas 7% dos municípios amazônicos contam com sistemas de logística reversa, concentrados nas regiões urbanas, principalmente das capitais estaduais, e não embutem os serviços de coleta seletiva, processamento e destino adequado para esses resíduos. O descarte ocorre primordialmente em lixões, onde há ampla contaminação dos meios aquáticos, terrestres e aéreos, debilitando o meio ambiente e a saúde das populações locais.

Como o Manual do MLA e o Plano de Obras das distribuidoras não apresentam um planejamento em relação ao descomissionamento desses sistemas, recairá aos municípios a responsabilidade pelo processamento do volume adicional de resíduos gerados a partir do programa de universalização.

---

26. Entre os critérios e parâmetros referidos estão: quantidade de domicílios com energia elétrica; estimativa da quantidade de produtos eletroeletrônicos comercializados e descartados no mercado interno; distância de deslocamento dos consumidores aos pontos de recebimento; e demonstração da capacidade de financiamento da operação da logística reversa.

Portanto, nos próximos anos, os formuladores de políticas e as partes interessadas na cadeia solar fotovoltaica e de armazenamento deverão se preparar para a geração de resíduos em escala e desenvolver mecanismos para fomentar e capitalizar as oportunidades desse segmento. Nesse sentido, recomenda-se:

- Planejar a implantação dos sistemas fotovoltaicos e de armazenamento *off-grid* no âmbito do programa MLA, com o estabelecimento em seu manual de operacionalização de um processo completo de descomissionamento dos sistemas e disposição final dos seus resíduos.
- Estimular investimento e financiamento público e privado para a gestão de fim de vida dos equipamentos utilizados no programa MLA, superando as barreiras de financiamento, geralmente facilitado aos grandes agentes, e garantindo o apoio de todas as partes interessadas, como cooperativas regionais, locais, pequenos distribuidores e processadores de resíduos.
- Promover a inovação contínua e a capacitação e formação técnica e científica de profissionais, utilizando os instrumentos de políticas públicas já existentes, como as chamadas estratégicas do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) e do Programa de Eficiência Energética (PEE) da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), para:
  - a.** Apoiar a criação de valor e a utilização dos módulos fotovoltaicos em fim de vida útil e de baterias de segunda vida, de origem estritamente nacional, para evitar a importação de resíduos de outros países;
  - b.** Elaborar subsídios técnicos e regulatórios para agregar valor à cadeia de gestão, coleta, reciclagem e destinação final dos equipamentos utilizados nos programas de universalização, e impulsionar a capacidade dos centros de reciclagem, especialmente em locais sensíveis como a Amazônia Legal;
  - c.** Investir em projetos de P&D, educação e treinamento para apoiar o gerenciamento de fim de vida dos equipamentos e o desenvolvimento de indústrias locais de reciclagem. O aumento dos fluxos de resíduos proporcionará oportunidades locais para os setores de energia e resíduos, com novos mer-

cados e fluxos comerciais, que devem ser coordenados com políticas de capacitação técnica local. O investimento deve considerar ainda a prioridade de contratação de representantes das comunidades locais para a implantação, operação e manutenção (O&M), e a disposição final dos equipamentos dos sistemas de geração e armazenamento de energia;

- d.** Estimular inovações tecnológicas a fim de criar processos de reciclagem para materiais raros e potencialmente perigosos contidos nos equipamentos. Para isso, será necessário, além do estímulo à inovação, o estímulo à formação profissional, com ganhos que superem os requisitos legais e forneçam benefícios ambientais e socioeconômicos.
- Adicionar regulamentos que abranjam os resíduos da cadeia solar à lei existente de resíduos sólidos, criando regras específicas para resíduos fotovoltaicos. Recomenda-se, também, que uma organização pública ou indicada por ela seja responsável pela divulgação de dados e informações de descarte de resíduos da cadeia solar *on-grid* e *off-grid*.
- Atribuir mapeamento dos mercados receptores de materiais fotovoltaicos, pelas distribuidoras atuantes na região ou entidade designada, incluindo a medição do volume e a composição de módulos FV de fim de vida de curto prazo. Do mesmo modo, mapear a disponibilidade de tecnologias, serviços e infraestrutura distribuída e escalável para a recuperação, reciclagem e destinação final desses equipamentos.
- Incluir sistema de monitoramento e de comunicação — atribuindo a responsabilidade às distribuidoras locais que implementam os sistemas —, que abranja os fluxos de resíduos nos regulamentos nacionais e regionais, a fim de melhorar a tomada de decisão e o planejamento. Esses dados estatísticos devem ser sistematizados e disponibilizados publicamente a fim de subsidiar o aprimoramento das previsões de fluxo de resíduos, aumentar a compreensão sobre as causas da falha dos equipamentos e serviços, e apoiar a adequação da estrutura regulatória pensando nas características regionais do país.

- Expandir a infraestrutura e os instrumentos de gestão de resíduos adaptados às condições de cada região da Amazônia, com mecanismos de coordenação entre os diversos setores da economia presentes nessas regiões, principalmente de energia e de resíduos. Nesse sentido, os fabricantes, importadores e outros atores participantes da cadeia solar fotovoltaica e de armazenamento devem garantir formação e capacitação periódica aos trabalhadores envolvidos na cadeia de desmonte e logística reversa. Essa tarefa poderia ser atribuída a uma nova entidade estruturada pelos atores participantes da cadeia ou utilizar a estrutura física e docente de institutos de capacitação técnica já existentes.
  
- Desenvolver uma política de adaptação da logística reversa específica para sistemas fotovoltaicos e de armazenamento na Amazônia, de forma a inseri-los no PNRs. Para isso, é necessária a segregação da logística reversa de FV centralizada, distribuída e *off-grid*, considerando especificações de cadeias de processos e de fiscalização para a geração centralizada, níveis de serviços para a geração distribuída e requisitos tecnológicos e informacionais de implementação dos sistemas *off-grid*, posto que:
  - a. Vinculada às grandes empresas geradoras de energia elétrica, a geração centralizada favorece a logística reversa, pois esses grupos têm cadeia de processos, de fiscalização e de O&M já bem definidos;
  
  - b. Equipamentos de geração fotovoltaica são classificados como eletroeletrônicos. Porém, o ideal seria criar uma categorização distinta para ela, visto que a geração distribuída também exige uma logística reversa distribuída, com nível de serviço e de metas diferentes da logística reversa dos sistemas centralizados<sup>27</sup>;

---

27. No caso dos sistemas fotovoltaicos, a logística reversa deve discriminar os sistemas centralizados e os distribuídos. Além disso, a indústria fotovoltaica precisa ter tratamento separado como acontece com os equipamentos eletroeletrônicos e as baterias, onde há a segregação entre baterias automotivas dos demais tipos.

- c.** A geração *off-grid* inclui a utilização de sistema de armazenamento e que requer informação do local de implantação e de tipo de tecnologia utilizada nesses sistemas para lidar com os futuros resíduos tóxicos em regiões com alto grau de sensibilidade ambiental e carentes de serviços de saneamento.
- Estabelecer um mecanismo que garanta o desmonte, a distribuição de pontos de coleta e a reciclagem ordenada dos sistemas fotovoltaicos e de armazenamento ao final da vida útil, evitando o acúmulo de resíduos em aterros ou outros locais indevidos com impactos à saúde pública e ao meio ambiente.





- \_\_\_\_\_. (2022a). *Decreto No 10.936, de 12 de janeiro de 2022*. Secretaria-Geral – Subchefia para Assuntos Jurídicos. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm)
- \_\_\_\_\_. (2022b). *Decreto No 11.111, de 29 de junho de 2022* (p. 1). Subchefia para Assuntos Jurídicos. <https://presrepublica.jus-brasil.com.br/legislacao/1560194021/decreto-11111-22>
- \_\_\_\_\_. (2022c). *Índice de reciclagem de latas de alumínio chega a 99% e Brasil se destaca como recordista mundial*. Logística Reversa. <https://www.gov.br/pt-br/noticias/meio-ambiente-e-clima/2022/04/indice-de-reciclagem-de-latas-de-aluminio-chega-a-99-e-brasil-se-destaca-como-recordista-mundial#:~:text=LOGÍSTICA REVERSA-Índice de reciclagem de latas de alumínio chega a 99,se destaca como recordista mundial&text=O Brasil é recordista mundial,o maior volume da história.>
- CANADIAN SOLAR INC. (2019). *Inverter Product Datasheet V1.1*. [https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/CanadianSolar\\_Inverter\\_Single-Phase\\_4-5KW.pdf](https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/CanadianSolar_Inverter_Single-Phase_4-5KW.pdf)
- \_\_\_\_\_. (2022). *PV Module Product Datasheet V1.5*. [https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2020/06/02121649/CS-Datasheet-HiKu6\\_CS6R-MS\\_v1.5\\_EN.pdf](https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2020/06/02121649/CS-Datasheet-HiKu6_CS6R-MS_v1.5_EN.pdf)
- CANAL ENERGIA. (2021). *Sunr aposta na explosão do mercado de reciclagem de painéis*. Negócios e Empresas. <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53168511/sunr-aposta-na-exploracao-do-mercado-de-reciclagem-de-paineis>
- CAZZOLA, P. (2018). *The Global EV Outlook 2018*. [https://doi.org/10.1016/S1673-8527\(08\)60140-X](https://doi.org/10.1016/S1673-8527(08)60140-X)
- CEMPRE. (2022). *Taxas de reciclagem*. <https://cempre.org.br/taxas-de-reciclagem/>
- CHINA DIALOGUE. (2022). *New policy grapples with incoming tide of renewable energy waste*. Energy; China Dialogue. <https://chinadialogue.net/en/>
- CHURCH, C., & WUENNENBERG, L. (2019). *Sustainability and Second Life: The case for cobalt and lithium recycling* (Issue March). <https://www.iisd.org/system/files/publications/sustainability-second-life-cobalt-lithium-recycling.pdf>
- CONAMA. (2008). *Resolução CONAMA no 401 de 04/11/2008* (p. 03). Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama. <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=108777>
- DALL-ORSOLETTA, A., FERREIRA, P., & GILSON DRANKA, G. (2022). Low-carbon technologies and just energy transition: Prospects for electric vehicles. *Energy Conversion and Management: X*, 16, 100271. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100271>
- DUAN, X., Zhu, W., RUAN, Z., XIE, M., CHEN, J., & REN, X. (2022). Recycling of Lithium Batteries—A Review. *Energies*, 15(5), 1611. <https://doi.org/10.3390/en15051611>
- DUFO-LÓPEZ, R., & BERNAL-AGUSTÍN, J. L. (2015). Techno-economic analysis of grid-connected battery storage. *Energy Conversion and Management*, 91, 394–404. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.038>
- ELETROBRAS. (2021). *Guia Técnico para Atendimento com Sistemas de Geração Fotovoltaica no âmbito dos Programas Luz para Todos e Mais Luz para a Amazônia*. [https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/copy2\\_of\\_programa-de-eletrificacao-rural/normativos/documentos/GuiaTecnicoParaAtendimentoComSistemasdeGeraoFotovoltaicanombitodosLPTeMLA.pdf](https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/copy2_of_programa-de-eletrificacao-rural/normativos/documentos/GuiaTecnicoParaAtendimentoComSistemasdeGeraoFotovoltaicanombitodosLPTeMLA.pdf)
- EPE. (2022a). *Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 ano base 2021*. [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArq\[...\]](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArq[...]) Estatístico de Energia Elétrica 2022.pdf
- \_\_\_\_\_. (2022b). *Balanco energético nacional ano base 2021*. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>
- EUROPEAN COMMISSION. (2019). *Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE)*. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02012L0019-20180704>
- GHIZONI, J. P. (2016). *Sistemas fotovoltaicos: estudo sobre reciclagem e logística reversa para o Brasil* [Universidade Federal de Santa Catarina]. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/176163/TCC - JoanaPauliGhizoni.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- GREENER. (2021). *Estudo Estratégico do Mercado de Armazenamento de Energia no Brasil 2021*. <https://www.greener.com.br/estudo/estudo-estrategico-do-mercado-de-armazenamento-de-energia-no-brasil-2021/>
- \_\_\_\_\_. (2022). *Estudo Estratégico Geração Distribuída: Mercado Fotovoltaico*. <https://greener.greener.com.br/estudo-gd-1s2021>
- GUO, J., LIU, X., YU, J., XU, C., WU, Y., PAN, D., & SENTHIL, R. A. (2021). An overview of the comprehensive utilization of silicon-based solid waste related to PV industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 169, 105450. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105450>
- HOHMANN, M., KIRSTEN VIDAL DE OLIVEIRA, A., & RÜTHER, R. (2022). Análise de Viabilidade Técnica da Utilização de Baterias de Segunda Vida Retiradas de Veículos Elétricos. *Anais Do IX*

- Congresso Brasileiro de Energia Solar. <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1195/1195>
- HUANG, B., PAN, Z., SU, X., & AN, L. (2018). Recycling of lithium-ion batteries: Recent advances and perspectives. *Journal of Power Sources*, 399, 274–286. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.07.116>
- IBER. (2019). *Acordo Setorial para implementação de sistema de logística reversa de Baterias Chumbo Ácido*. [https://iberbrasil.org/uploads/downloads/1607452495-acordo\\_setorial\\_baterias\\_chumbo\\_acido\\_AG019.pdf](https://iberbrasil.org/uploads/downloads/1607452495-acordo_setorial_baterias_chumbo_acido_AG019.pdf)
- \_\_\_\_\_. (2022). *Sobre*. Instituto Brasileiro de Energia Reciclável: IBER. <https://www.iberbrasil.org.br/sobre>
- IBGE. (2011). *Brazil – Censo Demográfico 2010 – IPUMS Subset*. <http://microdata.worldbank.org/index.php/catalog/2078>
- \_\_\_\_\_. (2015). *PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios*. IBGE Cidades. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/pesquisa/44/47044>
- \_\_\_\_\_. (2017). *Série histórica*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc\\_ipca/defaultseriesHist.shtm](https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultseriesHist.shtm)
- \_\_\_\_\_. (2022). *Malha Municipal*. Geociências. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>
- \_\_\_\_\_. (2023). *Como são os domicílios dos brasileiros?* IBGE Educa. <https://educa.ibge.gov.br/criancas/brasil/nosso-povo/20825-como-sao-os-domicilios-dos-brasileiros.html>
- IEA. (2021). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. *International Energy Agency*, 224. [https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c--10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector\\_CORR.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c--10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf)
- \_\_\_\_\_. (2022a). *Global Supply Chains of EV Batteries*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/4eb8c252-76b1-4710-8f5e--867e751c8dda/GlobalSupplyChainsOfEVBatteries.pdf>
- \_\_\_\_\_. (2022b). Special Report on Solar PV Global Supply Chains. In *Special Report on Solar PV Global Supply Chains*. <https://doi.org/10.1787/9e8b0121-en>
- \_\_\_\_\_. (2022c). *World Energy Outlook 2022*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c-1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>
- IEI. (2022). *Universalização do acesso à eletricidade no Brasil: avaliação dos SIGFIs e MIGDIs*. International Energy Initiative (iei). [https://iei-brasil.org/wp-content/uploads/2022/10/Universalizacao\\_acesso\\_SIGFIs\\_MIGDIs.pdf](https://iei-brasil.org/wp-content/uploads/2022/10/Universalizacao_acesso_SIGFIs_MIGDIs.pdf)
- ILA. (2015). *Recycling lead batteries*. [http://ila-lead.org/wp-content/uploads/2021/05/ILA9927-FS\\_Recycling\\_V08.pdf](http://ila-lead.org/wp-content/uploads/2021/05/ILA9927-FS_Recycling_V08.pdf)
- INFOLINK CONSULTING. (2022). *1H22 module shipment ranking: Jinko retakes No. 1. Solar*. <https://www.infolink-group.com/energy-article/1h22-module-shipment-ranking-jinko-retakes-no1>
- INPE. (2022). *Média do Total Diário da Irradiação Global Horizontal para o Estado do Amazonas*. [http://labren.ccst.inpe.br/atlas2\\_tables/AM\\_glo.html](http://labren.ccst.inpe.br/atlas2_tables/AM_glo.html)
- IRENA. (2016). End-Of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels. In *International Renewable Energy Agency and the International Energy Agency Photovoltaic Power Systems*. IRENA. [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA\\_IEAPVPS\\_End-of-Life\\_Solar\\_PV\\_Panels\\_2016.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf)
- KEBEDE, A. A., KALOGIANNIS, T., MIERLO, J. VAN, & BERECIBAR, M. (2022). A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112213. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112213>
- KOMOTO, K., & LEE, J. S. (2018). End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies. In *IEA PVPS Task 12, International Energy Agency Power Systems Programme, Report IEA-PVPS T12* (IEA-PVPS T12-10:2018; Vol. 10). [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End\\_of-Life\\_Management\\_of\\_Photovoltaic\\_Panels\\_Trends\\_in\\_PV\\_Module\\_Recycling\\_Technologies\\_by\\_task\\_12.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/01/End_of-Life_Management_of_Photovoltaic_Panels_Trends_in_PV_Module_Recycling_Technologies_by_task_12.pdf)
- KOTAK, Y., MARCHANTE FERNÁNDEZ, C., CANALS CASALS, L., KOTAK, B. S., KOCH, D., GEISBAUER, C., TRILLA, L., GÓMEZ-NÚÑEZ, A., & SCHWEIGER, H.-G. (2021). End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle. *Energies*, 14(8), 2217. <https://doi.org/10.3390/en14082217>
- LATUNUSSA, C. E. L., ARDENTE, F., BLENGINI, G. A., & MANCINI, L. (2016). Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 156, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>
- LI, M., YANG, J., LIANG, S., HOU, H., HU, J., LIU, B., & KUMAR, R. V. (2019). Review on clean recovery of discarded/spent lead-acid battery and trends of recycled products. *Journal of Power Sources*, 436, 226853. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.226853>
- LICCO, E. A. (2000). *Chumbo secundário: a reciclagem das baterias chumbo-ácido* [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/T.6.2020.tde-02042020-113106>

- MARTINEZ-BOLANOS, J. R., UDAETA, M. E. M., GIMENEZ, A. L. V., & SILVA, V. O. da. (2020). Economic feasibility of battery energy storage systems for replacing peak power plants for commercial consumers under energy time of use tariffs. *Journal of Energy Storage*, 29, 101373. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101373>
- \_\_\_\_\_. Silva, V., Zucchi, M., Heideier, R., Relva, S., Saidel, M., & Fadigas, E. (2021). Performance Analysis of Topologies for Autonomous Hybrid Microgrids in Remote Non-Interconnected Communities in the Amazon Region. *Sustainability*, 13, 44. <https://doi.org/10.3390/su13010044>
- MATHEWS, I., XU, B., HE, W., BARRETO, V., BUONASSISI, T., & PETERS, I. M. (2020). Technoeconomic model of second-life batteries for utility-scale solar considering calendar and cycle aging. *Applied Energy*, 269, 115127. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115127>
- MEZA, M. L. F. G., OLIVEIRA, M. F. B. G. de, & VASCONCELOS, M. C. (2013). O papel do município na gestão de resíduos sólidos: programas e projetos da prefeitura de Curitiba. 1º SEMINÁRIO NACIONAL DE PLANEJAMENTO E DESENVOLVIMENTO, 1–17. <https://studiobiodiversidade.files.wordpress.com/2013/09/o-papel-do-munic3adpio-na-gest3ao-de-resc3adduos-sc3b3lidos-programas-e-projetos-da-prefeitura-de-curitiba.pdf>
- MINFRA. (2022). *PNLT – Plano Nacional de Logística e Transportes*. Ministério Da Infraestrutura. <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas>
- MMA. (2022). *Plano Nacional de Resíduos Sólidos*. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/decreto/D11043.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D11043.htm)
- MME. (2018). *Programa Nacional de Universalização Do Acesso e Uso Da Energia Elétrica: Manual de Operacionalização Para o Período de 2018 a 2022* (p. 28). Ministério de Minas e Energia (MME). <https://www.gov.br/mme/pt-br/destaques/programa-de-eletrificacao-rural/normativos/arquivos/manual-lpt-2018-a-2022.pdf>
- \_\_\_\_\_. (2020). *Programa nacional de universalização do acesso e uso da energia elétrica na Amazônia Legal: Manual de operacionalização do programa mais luz para a Amazônia* (p. 19). Ministério de Minas e Energia (MME). [https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/copy2\\_of\\_programa-de-eletrificacao-rural/normativos/documentos/manual\\_de\\_operacionalizacao\\_do\\_programa\\_mais\\_luz\\_para\\_a\\_amazonia\\_edicao\\_final.pdf](https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/copy2_of_programa-de-eletrificacao-rural/normativos/documentos/manual_de_operacionalizacao_do_programa_mais_luz_para_a_amazonia_edicao_final.pdf)
- \_\_\_\_\_. (2022a). *Decreto amplia vigência dos Programas Luz para Todos e Mais Luz para a Amazônia*. Notícias. <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/decreto-amplia-vigencia-dos-programas-luz-para-todos-e-mais-luz-para-a-amazonia-1#:~:text=Foi publicado%2C nesta quinta-feira,encerrar ao final de 2022>
- \_\_\_\_\_. (2022b). *Nota Técnica N°8/2022/DPUE/SEE* (p. 13). Ministério de Minas e Energia (MME). [http://antigo.mme.gov.br/c/document\\_library/get\\_file?uuid=d78641c0-f326-26c0-b-230-da7088c86cb6&groupId=36122](http://antigo.mme.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=d78641c0-f326-26c0-b-230-da7088c86cb6&groupId=36122)
- \_\_\_\_\_. (2022c). *Portaria N° 687/GM/MME, de 13 de setembro de 2022*. <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=16/09/2022&jornal=515&pagina=776>
- MONTENEGRO, A., PIRES, A. M., PINTO, G. X. de A., SCHNEIDER, K., & NASCIMENTO, L. R. do. (2021). *A mão de obra na cadeia produtiva do setor solar brasileiro*. <https://www.absolar.org.br/wp-content/uploads/2021/12/Estudo-Cadeia-Produtiva-Solar.pdf>
- MOURA. (2017). *Baterias Moura são recicladas*. Baterias Moura. <https://www.moura.com.br/blog/baterias-moura-sao-totalmente-recicladas/>
- \_\_\_\_\_. (2020). *Manual Técnico: A bateria para instalações ecoeficientes*. <https://docplayer.com.br/19634621-Manual-tecnico-a-bateria-para-instalacoes-ecoeficientes-t-e-c-h-n-o-l-o-g-y.html>
- \_\_\_\_\_. (2022a). *Sobre*. Institucional. <https://www.moura.com.br/sobre-nos/>
- \_\_\_\_\_. (2022b). *Sustentabilidade*. Institucional. <https://www.moura.com.br/sustentabilidade/>
- MROZIK, W., RAJAEIFAR, M. A., HEIDRICH, O., & CHISTENSEN, P. (2021). Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 14(12), 6099–6121. <https://doi.org/10.1039/D1EE00691F>
- PEYERL, D., RELVA, S. G., SILVA, V. O. (2023). Energy Transition: Changing the Brazilian Landscape Over Time. In: Peyerl, D., Relva, S., Da Silva, V. (eds) *Energy Transition in Brazil*. The Latin American Studies Book Series. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-21033-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-21033-4_1)
- PROCEL. (2022). *Equipamentos*. Dicas de Economia de Energia. <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D>
- RAMOS, C., RUIZ, E. T. N. F., BICALHO, F. W., BARBOSA, J. M., BARROS, L. V., & RABASSA, M. M. M. (2018). Cadeia de Valor da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil. *Sebrae*, 364. [http://www.sebrae.com.br/Sebrae/PortalSebrae/Anexos/estudo\\_energia\\_fotovoltaica\\_baixa.pdf](http://www.sebrae.com.br/Sebrae/PortalSebrae/Anexos/estudo_energia_fotovoltaica_baixa.pdf)

- RECICLA SAMPÁ. (2022). *Fatos e estatísticas sobre reciclagem de garrafa PET*. <https://www.reciclasampa.com.br/artigo/fatos-e-estatisticas-sobre-reciclagem-de-garrafa-pet#:~:text=Reciclagem com garrafa pet&text=De acordo com o último, que foi registrado em 2018.>
- REDDY, T. B., & LINDEN, D. (2011). *Linden's handbook of batteries* (4th ed.). McGraw-Hill.
- REINHARDT, R., CHRISTODOULOU, I., GASSÓ-DOMINGO, S., & AMANTE GARCÍA, B. (2019). Towards sustainable business models for electric vehicle battery second use: A critical review. *Journal of Environmental Management*, 245, 432–446. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.095>
- ROLLET, C., & BEETZ, B. (2020). *Recycling PV panels: Why can't we hit 100%?* PV Magazine International. <https://www.pv-magazine.com/2020/08/26/recycling-pv-panels-why-cant-we-hit-100/#:~:text=EU regulations require 85%25 collection,to solar products in 2012>
- SILVA, V. O. da. (2022). *Como inserir recursos energéticos importados no planejamento energético nacional? Modelo de determinação de recursos energéticos para a integração energética transnacional* [Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/T.3.2022.tde-19012023-091237>
- \_\_\_\_\_. V. O. da, De Paula, J., Veiga Gimenes, A. L., & Udaeta, M. E. M. (2022). Impacts of Transmission Lines on Tropical Forests – Assessment of the Sociocultural and Environmental Aspects. *2022 6th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA)*, 226–232. <https://doi.org/10.1109/ICGEA54406.2022.9791908>
- SINIR+. (2020a). *Baterias de Chumbo-Ácido*. Painel de Logística Reversa. <https://sinir.gov.br/paineis/logistica-reversa/>
- \_\_\_\_\_. (2020b). *Relatório Estadual de Gestão de Resíduos Sólidos*. Relatórios. <https://sinir.gov.br/relatorios/estadual/>
- SNIS. (2021). *Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos: Visão geral ano de referência 2020*. [https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO\\_TEMATICO\\_VISAO\\_GERAL\\_RS\\_SNIS\\_2021.pdf](https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2021.pdf)
- \_\_\_\_\_. (2022a). *Secretaria Nacional de Saneamento*. Saneamento. <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/secretaria-nacional-de-saneamento>
- \_\_\_\_\_. (2022b). *SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento*. Saneamento. <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/pmss/snis>
- SOARES, R. A. (2017). *Logística reversa dos módulos solares fotovoltaicos de silício cristalino no Brasil* [Universidade Federal do Ceará]. [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/45606/3/2017\\_tcc\\_rasoares.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/45606/3/2017_tcc_rasoares.pdf)
- STROE, D. I., KNAP, V., SWIERCZYNSKI, M., STROE, A. I., & TEODOR-RESCU, R. (2017). Operation of a Grid-Connected Lithium-Ion Battery Energy Storage System for Primary Frequency Regulation: A Battery Lifetime Perspective. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53, 430–439.
- THOMPSON, D., HYDE, C., HARTLEY, J. M., ABBOTT, A. P., ANDERSON, P. A., & HARPER, G. D. J. (2021). To shred or not to shred: A comparative techno-economic assessment of lithium ion battery hydrometallurgical recycling retaining value and improving circularity in LIB supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105741. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105741>
- TIAN, X., WU, Y., HOU, P., LIANG, S., QU, S., XU, M., & ZUO, T. (2017). Environmental impact and economic assessment of secondary lead production: Comparison of main spent lead-acid battery recycling processes in China. *Journal of Cleaner Production*, 144, 142–148. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.171>
- TIGO ENERGY. (2022). *El Battery*. *TSB-10/20-US Specification*. [https://assets-global.website-files.com/5fad551d-7419c7a0e9e4aba4/614bf48ee6034e58377482eb\\_Tigo\\_Energy\\_El\\_Battery\\_datasheet\\_EN\\_09222021.pdf](https://assets-global.website-files.com/5fad551d-7419c7a0e9e4aba4/614bf48ee6034e58377482eb_Tigo_Energy_El_Battery_datasheet_EN_09222021.pdf)
- VEGA-GARITA, V., HANIF, A., NARAYAN, N., RAMIREZ-ELIZONDO, L., & BAUER, P. (2019). Selecting a suitable battery technology for the photovoltaic battery integrated module. *Journal of Power Sources*, 438, 227011. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.227011>

## ANEXO A

### Especificações dos componentes dos sistemas fotovoltaicos

A metodologia para o dimensionamento da demanda e geração de resíduos de sistemas fotovoltaicos considerou os equipamentos: **módulo fotovoltaico**, com potência de 420 Wp, eficiência de 21,5%, massa de 21,3 kg e vida útil de 25 anos (CANADIAN SOLAR INC, 2022); o **inversor solar**, com potência de 1,5 kW e 5,8 kWp, massa de 4,5 e 11,5 kg e vida útil de 10 anos (CANADIAN SOLAR INC., 2019); a **bateria de lítio**, com capacidade de 3,5 e 7 kWh, massa de 65 108 kg e vida útil de 10 anos (Tigo Energy, 2022); e duas **baterias de chumbo** (Moura, 2020), com capacidades de 80 e 30 A, massa de 24,1 e 10,8 kg e vida útil de 4 anos, respectivamente. Abaixo, segue o detalhamento do dimensionamento.

#### METODOLOGIA PARA O DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para estimar o arranjo do sistema de geração é necessário calcular a energia elétrica gerada mensalmente pelo módulo fotovoltaico especificado, levando em conta a irradiação global horizontal média de 4,3 kWh/m<sup>2</sup>.dia (INPE, 2022). Assim, por meio da Eq. 1, determina-se o número de módulos (M), em que C é o consumo máximo de energia; P é a potência do módulo; Ef é a eficiência do módulo; HSP é a hora de sol pleno; e D são os dias em um mês.

Equação 1.

$$M = \frac{C}{\left( \frac{P \cdot E_f \cdot HSP \cdot D}{1000} \right)}$$

Com o módulo fotovoltaico especificado, é possível gerar 11,6 kWh/mês por módulo, indicando a necessidade de quatro módulos para atender à demanda mínima de 45 kWh/mês e 15 módulos para atender a demanda máxima 180 kWh/mês por unidade consumidora.

O dimensionamento do banco de baterias de chumbo foi feito seguindo as recomendações do fabricante Moura (2020). Para o dimensionamento da quantidade de baterias em série, foi preciso calcular a razão entre a tensão nominal do sistema e a voltagem da bateria. Considerando dois dias de autonomia para o banco de baterias e o consumo mensal, transformado para diário, determinado pelo programa, chegou-se a 3 kWh/dia e 12 kWh/dia de energia consumida. Aplicando o fator de profundidade de descarga indicado pelo fabricante, calculou-se a necessidade de armazenar 10 kWh e 40 kWh de energia. Dividindo esse valor por 36, voltagem do banco contendo três baterias em série e adicionando o fator de envelhecimento, foi possível estimar a corrente necessária para as baterias, que permitiu a escolha das baterias 12MF30 e 12MF80 conforme orientado pelo fabricante.

Realizou-se o dimensionamento das baterias de íon-lítio com base na orientação do Guia Técnico para Atendimento com Sistemas de Geração Fotovoltaica no âmbito dos Programas Luz para Todos e Mais Luz para a Amazônia, realizado pela Eletrobras (2021), a partir da Eq. 2.

#### Equação 2.

$$Capacidade [Wh] = \frac{Consumo_{CA} \left[ \frac{Wh}{dia} \right] \cdot Autonomia[dias]}{\eta_{CC/CA} \cdot DoD_{m\acute{a}x} \cdot Capacidade_{EOL}}$$

Sendo: o  $Consumo_{CA}$  – consumo diário de referência;  $Autonomia$  – corresponde ao período em que o sistema será suprido pela energia armazenada pelo banco de baterias;  $\eta_{CC/CA}$  – eficiência total entre o consumo em CC no banco de baterias e o consumo em CA;  $DoD_{m\acute{a}x}$  – profundidade de descarga máxima do banco de baterias; e  $Capacidade_{EOL}$  – capacidade energética nominal do banco de baterias

Os valores de autonomia, eficiência, profundidade de descarga e capacidade energética nominal foram fornecidos pelo Guia Técnico. Já o Consumo diário de referência foi calculado com base no consumo mensal de energia definido pelo MLA e, posteriormente, convertido para consumo diário. Calculou-se a capacidade das baterias em 1,3 kWh e 5,1 kWh para os sistemas de demanda mínima e máxima. Assim, optou-se pelas baterias de modelo BYD B-BOX LV de bateria íon de lítio para ambos os sistemas, diferenciando-se, apenas, pela quantidade de módulos. Para o sistema de demanda mínima, a bateria escolhida contém um módulo que fornece 3,5 kWh e pesa 65 kg. Para a demanda máxima, a bateria contém dois módulos, soma 7 kWh e pesa 108kg.

Por fim, o dimensionamento dos inversores foi realizado a partir do cálculo da potência dos sistemas. O sistema de menor porte soma 1,68 kWp, enquanto o sistema de maior porte conta com 6,3 kWp de potência instalada. Assim, descontando 15% da potência instalada, chega-se à potência de 1,4 kW e 5,4 kW necessária para a escolha dos respectivos inversores. Selecionou-se os modelos QS1A-BR (APsystems, 2020) e CSI-4KTL1P-GI-FL (CANADIAN SOLAR INC., 2019), contendo 1,5 kW e 5,8 kW de potência e massa de 4,5 kg e 11,8 kg, respectivamente.

### **METODOLOGIA DE CÁLCULO DA DEGRADAÇÃO DOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS**

Para as projeções de geração de resíduos, considerou-se que o sistema apresenta 25 anos de vida útil de um dos equipamentos do sistema. Assim, dentro desse período, foi considerada a utilização de quatro e 15 unidades de módulos, três inversores solares e três baterias ao longo da operação de cada SIGFI. Baseando-se na metodologia de Komoto and Lee (2018) – IRENA –, foi possível estimar a probabilidade de degradação dos módulos fotovoltaicos ao longo do tempo. Tal metodologia é baseada na função de Weibull expressa pela Eq. 3.

**Equação 3.**  $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^\alpha}$

Segundo a metodologia, há dois cenários para aplicação da função de Weibull: *regular* e *early loss*. Tais cenários orientaram o fator de forma ( $\alpha$ ) da Eq. 3. O primeiro cenário considera um  $\alpha$  de 5,3759. O segundo cenário integra variáveis de perda, como perdas precoces de transporte e de instalação, resultando em um  $\alpha$  2,4928. Aqui, opta-se pelo segundo cenário, *early loss*, dada a complexidade da área de implantação dos sistemas. Foi considerado um tempo de vida ( $t$ ) de 25 anos e probabilidade de degradação de 99% dos módulos em 40 anos ( $T$ ).

## ANEXO B

**Tabela 9.**  
Características básicas das baterias de chumbo-ácido e íon-lítio.

**Fonte:**  
(BloombergNEF, 2021; Greener, 2021; IEA, 2022b; Kebede et al., 2022; Martinez-Bolanos et al., 2020; Reddy & Linden, 2011; Vega-Garita et al., 2019).

CARACTERÍSTICAS	CHUMBO-ÁCIDO	ÍON-LÍTIO
<b>Composição</b>	Pb+H <sub>2</sub> +SO <sub>4</sub>	LiFePO <sub>4</sub> (LFP), LiCoO <sub>2</sub> (LCO), LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , LiNiMnCoO <sub>2</sub> (NMC), LiNiCoAlO <sub>2</sub> (NCA)
<b>Segurança</b>	Média	Baixa-Média
<b>Explosividade</b>	Baixa	Média
<b>Inflamabilidade</b>	Baixa	Média
<b>Toxidade</b>	Alta	Média
<b>Vida Útil</b>	200-1.000 ciclos ou 4-15 anos	1.000-10.000 ciclos ou 5-15 anos
<b>Taxa de Autodescarga</b>	6-10% do total num mês inteiro sem utilização	1% do total num mês inteiro sem utilização
<b>Densidade de Energia</b>	30-50 Wh/kg 25-100 kWh/m <sup>3</sup>	75-250 Wh/kg 150-500 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Densidade de Potência</b>	75-300 Wh/kg 10-700 kWh/m <sup>3</sup>	150-2.000 Wh/kg 50-5.000 kWh/m <sup>3</sup>
<b>Eficiência de Carregamento e Descarregamento</b>	75-85%	85-98%
<b>Tempo de Descarga</b>	Até 20h	Até 4h
<b>Temperatura ideal de operação</b>	20 a 30°C	30°C
<b>Temperatura de operação</b>	-40 a 50°C são tolerados, mas diminuem sua vida útil	20 a 45°C são tolerados, mas diminuem drasticamente sua vida útil
<b>Custo da Energia</b>	54-400 USD/kWh	111-2.500 USD/kWh
<b>Custo da Potência</b>	200-651 USD/kWh	900-4.000 USD/kWh
<b>O&amp;M</b>	7-15 USD/kW/ano	6-12 USD/kW/ano
<b>Maturidade Tecnológica</b>	Sistema mais maduro, comercializável e reciclável do mundo	Baixo-Médio. NCA e LFP são os mais atrativos técnica-economicamente
<b>Impacto Ambiental</b>	Alto, caso não haja logística reserva	Baixo-Médio, caso não haja logística reserva
<b>Período de Armazenamento</b>	Baixo-Médio prazo	Baixo-Médio prazo

## ANEXO C

Ao longo do projeto, foram realizadas 29 entrevistas com a participação de 52 atores (Tabela 9 e 10) e duas reuniões internas com representantes de entidades de diversas classes do setor de energia solar fotovoltaica e armazenamento para diagnosticar a capacidade e o interesse desses atores de se inserirem na região da Amazônia Legal e, por fim, identificar o quadro regulatório e institucional voltados à efetivação das metas de universalização do acesso à energia elétrica das comunidades remotas.

**Tabela 10.**

Consolidação de entrevistas por tipo de entidade de classe e contribuições aos objetivos.

Entidades		Entrevistados
Classe	Nº	Nº
Universidades e Institutos de Pesquisa	6	13
Associações e Fóruns de Energia Elétrica	4	6
Empresas, Concessionárias e Consultorias	10	16
Órgãos governamentais	2	11
Organizações da Sociedade Civil	7	6
<b>Total</b>	<b>29</b>	<b>52</b>

**Tabela 11.**

Lista de entidades e participantes de Reuniões e Entrevistas.

Tipo de Entidade	Entrevistados
Associações e Fóruns de Energia Elétrica	ABGD, G2A Consultores, ABSOLAR
Universidades e Institutos de Pesquisa	UNIR, CIBIOGÁS, UFAM, CENERGIA-UFRJ, CERPCH/UNIFEI, UFSC
Organizações da Sociedade Civil	WWF-Brasil, Fórum de Energias Renováveis de Roraima, Idesam, ISA, Greenpeace Brasil, IPAM
Empresas, Concessionárias e Consultorias	Usina Azul, Unicoba, Trina Solar, Volt Robotics, Equatorial, (re)energisa, Energisa, Empowered by Light, Neosolar, Moura, New Charge, Basscon
Órgão governamental	IBGE



**Instituto de Energia e Meio Ambiente**

11 3476 2850 • [energiaeambiente.org.br](http://energiaeambiente.org.br)  
[energiaeambiente@energiaeambiente.org.br](mailto:energiaeambiente@energiaeambiente.org.br)  
Rua Artur de Azevedo, 1212, 9º andar,  
São Paulo-SP • CEP 05404-003

 [twitter.com/iema\\_instituto](https://twitter.com/iema_instituto)

 [linkedin.com/company/instituto-de-energia-e-meio-ambiente](https://www.linkedin.com/company/instituto-de-energia-e-meio-ambiente)

 [facebook.com/institutoenergiaeambiente](https://www.facebook.com/institutoenergiaeambiente)

 [instagram.com/energiaeambiente](https://www.instagram.com/energiaeambiente)